



TUGAS AKHIR - TM 141585

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU DAN KECEPATAN ANGIN

MUHAMAD FALAH DIAS SUNANDI
NRP 2110 100 154

Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM 141585

NUMERICAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE WITH VARIATION OF THE NUMBER OF BLADE AND WIND VELOCITY

MUHAMAD FALAH DIAS SUNANDI
NRP 2110 100 154

Academic Advisor
Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU DAN KECEPATAN ANGIN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMAD FALAH DIAS SUNANDI DJ

NRP. 2110 100 154

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.
(NIP. 198105292003122001)(Pembimbing)
2. Bambang Arip Dwiyanoro, S.T., M.Eng., Ph.D.
(NIP. 197804012002121001)(Penguji I)
3. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.
(NIP. 197104051997021001)(Penguji II)
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
(NIP. 196412281990031002)(Penguji III)



SURABAYA

Juli, 2016

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan rahmat-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun material dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Kedua orang tua yang telah membesarkan, menasehati, dan mendoakan penulis demi kelancaran kuliah dan tugas akhir penulis.
2. Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
3. Bapak Bambang Arip Dwiyanoro, S.T., M.Eng., Ph.D., Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., dan Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas kritik dan saran yang telah diberikan.
4. Taranita Maharani Yunus dan keluarga yang selalu mendukung penulis selama penyelesaian Tugas Akhir.
5. Semua warga Laboratorium Mekanika Fluida yang selalu menemani *headbanger's ball*.
6. Semua anggota Mesin ITS Autosport, baik anggota biasa, pengurus, anggota luar biasa, dan dewan kehormatan yang selalu membuat hari-hari penulis menjadi INDAH.
7. Dulur-dulur DOTA 2 yang selalu menemani penulis bermain.

8. Bapak Nur dan Bapak Sutrisno selaku karyawan di Laboratorium Mekanika Fluida yang telah memberi motivasi dan nasihat.
9. Seluruh SMRM yang telah membantu perkembangan positif akademik dan moral penulis.
10. Seluruh dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS,
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU DAN KECEPATAN ANGIN

Nama Mahasiswa : Muhamad Falah Dias Sunandi
NRP : 2110 100 154
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

Abstrak

Kebutuhan energi pada saat ini semakin meningkat. Bahan bakar fosil yang seringkali digunakan memiliki beberapa kerugian, seperti tidak terbarukan dan tidak ramah lingkungan. Angin menjadi salah satu alternatif sumber energi. Alat yang digunakan untuk mengekstraksi energi angin ini adalah turbin angin. Hal inilah yang mendasari penelitian ini agar didapatkan desain turbin angin yang mampu mengekstraksi tenaga angin seoptimal mungkin.

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah studi numerik dua dimensi dengan aliran unsteady yang menggunakan software STAR CCM+ 9.02.007-R8. Model yang digunakan adalah turbin angin Savonius tipe S dengan jumlah sudu 2 dan 3. Turbulence model yang digunakan adalah k-epsilon realizable. Putaran poros diadaptasi dari hasil eksperimen Dwiyantoro et al (2015) dengan kecepatan angin sebesar 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Boundary condition untuk inlet adalah velocity inlet, untuk outlet ialah pressure outlet, dinding atas dan bawah sebagai symmetry plane, dan selebihnya menggunakan wall.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah visualisasi aliran berupa kontur kecepatan dan tekanan, serta data grafik berupa nilai torsi dan koefisien daya. Turbin angin Savonius dua sudu memiliki koefisien daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tiga sudu dalam rentang TSR 0,69-

0,82. Koefisien daya tertinggi yang dicapai turbin angin Savonius dua sudu adalah 0,183 pada TSR 0,80. Namun turbin angin Savonius tiga sudu memiliki uniformity torsi yang lebih baik dibandingkan dengan turbin angin Savonius dua sudu.

Kata Kunci : Studi Numerik, Turbin Angin, Savonius, Torsi, Koefisien Daya, Visualisasi Aliran, Jumlah Sudu, Kecepatan Angin, Metode Komputasi Fluida, Simulasi, Unsteady, Putaran, Perbedaan Tekanan

NUMERICAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE WITH VARIATION OF THE NUMBER OF BLADE AND WIND VELOCITY

Student Name : Muhamad Falah Dias Sunandi
NRP : 2110100154
Departement : Mechanical Engineering, FTI – ITS
Academic Advisor : Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

Abstract

Energy needs at this time is increasing. Fossil fuels have many disadvantages, such as not renewable and environmentally unfriendly. Wind becoming an alternative source of energy. The device used to extract this wind energy is a wind turbine. This is what underlies this study in order to get wind turbine optimum design to extracting wind power optimally.

The method used in this study is a two-dimensional numerical studies with the unsteady flow using Star CCM + 9.02.007-R8 software. The model used is the Savonius wind turbine type S with number of blades 2 and 3. Turbulence model used in this simulation was k-epsilon realizable. Shaft rotational speeds were adapted from experimental results by Dwiyantoro et al (2015) with wind velocities of at 5, 7, 9, 11, 13, and 15 m/s. Boundary condition for inlet is velocity inlet, for outlet is pressure outlet, the upper and lower walls as a symmetry plane, and the rest as wall.

The results obtained from this study is flow visualization such as velocity and pressure contours, as well as graphical data such as the value of the torque and power coefficient. Savonius wind turbine with two blades has higher power coefficient compared to that with three blades in TSR ranges from 0.69 to 0.82. The highest coefficient of power achieved by the two blades Savonius wind turbine is 0.183 on the TSR of 0.80.

Keywords : Numerical Study, Wind Turbine, Savonius, Torque, Power Coefficient, Flow Visualization, Number of Blade, Wind Velocity, Computational Fluid Dynamic, Simulation, Unsteady, Rotation, Pressure Drop

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.1.1. Dwiyantoro et al (2015).....	5
2.1.2. Rogowski et al (2015)	7
2.1.3. Menet et al (2013)	10
2.1.4. Saha et al (2008).....	15
2.2. Dasar Teori.....	19
2.2.1. Energi Angin	19

2.2.2. Potensi Tenaga Angin.....	19
2.2.3. Turbin Angin Sumbu Vertikal	22
2.2.4. Turbin Angin Savonius.....	23
2.2.5. Teori Betz	25
2.2.6. Torsi & Koefisien Daya.....	30
2.2.7. <i>Tip Speed Ratio</i>	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Variasi dan <i>Domain</i> Simulasi.....	35
3.1.1. Variasi.....	35
3.1.2. <i>Domain</i> Simulasi	35
3.2. Tahap Pre Processing	36
3.2.1. Pembuatan Geometri dan <i>Meshing</i>	36
3.2.2. <i>Boundary Condition</i>	38
3.2.3. Parameter	40
3.2.3.1. <i>Models</i>	40
3.2.3.2. <i>Materials</i>	40
3.2.3.3. Rotation Motion & Rotating Reference Frame	40
3.3. Tahap <i>Processing</i>	41
3.4. Tahap Post Processing.....	41
3.5. Diagram Alir	41
BAB IV ANALISIS DAN DISKUSI.....	45
4.1. Putaran Turbin dan <i>Tip Speed Ratio</i>	45
4.2. Time Step	45
4.3. Analisis Hasil Simulasi	46

4.3.1. Visualisasi Aliran	47
4.3.1.1. Kontur Kecepatan.....	47
4.3.1.2. Kontur Tekanan.....	52
4.3.2. Grafik.....	56
4.3.2.1. Torsi pada Tiap Sudut	56
4.3.2.2. Torsi Rata-Rata pada Tiap Kecepatan Angin..	58
4.3.2.3. Koefisien Daya	59
BAB V PENUTUP	61
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Rekomendasi.....	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN	65
TENTANG PENULIS	67

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.2	Variasi Penelitian (Rogowski et al, 2015).....	8
Tabel 2.3	Tingkatan Kecepatan Angin 10 meter di atas Permukaan Tanah (World Wind Energy Association, 2007).....	21
Tabel 3.1	Variasi Penelitian	35
Tabel 4.1	Data yang Digunakan dalam Simulasi	45
Tabel 4.2	<i>Time Step</i> Tiap Kecepatan Angin.....	46

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Layout</i> Turbin Angin Darrieus-Savonius	5
Gambar 2.2 Grafik Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin Angin.....	6
Gambar 2.3 Grafik Koefisien Daya Turbin Angin Terhadap TSR	7
Gambar 2.4 Geometri dan <i>domain</i> turbin angin Savonius	8
Gambar 2.5 <i>Mesh</i> di Sekitar Sudu Turbin	9
Gambar 2.6 Grafik Koefisien Daya Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (<i>Turbulence Models</i>)	9
Gambar 2.7 Grafik Koefisien Daya Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (<i>Gap Length</i>)	10
Gambar 2.8 Grafik Koefisien Daya Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (Kecepatan Angin)	10
Gambar 2.9 Geometri Turbin Angin Savonius.....	11
Gambar 2.10 <i>Mesh</i> dan y^+ pada Sudu Turbin.....	12
Gambar 2.11 <i>Mesh</i> dan Batas <i>Domain</i>	12
Gambar 2.12 <i>Boundary Condition</i> yang Ditetapkan	13
Gambar 2.13 <i>Static Pressure Field</i>	13
Gambar 2.14 <i>Flow Field</i> Ketika Sudu Rotor $\Theta = 45^\circ$	13
Gambar 2.15 Grafik Koefisien Torsi Statis Terhadap Sudut Angin	14
Gambar 2.16 Grafik Koefisien Torsi Terhadap Waktu	14
Gambar 2.17 Grafik Koefisien Torsi Terhadap <i>Speed Ratio</i>	15
Gambar 2.18 Geometri Turbin Angin Savonius Dua Sudu.....	15
Gambar 2.19 Geometri Turbin Angin Savonius Tiga Sudu	16
Gambar 2.20 Geometri Sudu (<i>Semicircular</i> dan <i>Twisted</i>)	16
Gambar 2.21 <i>Low Speed Wind Tunnel</i>	17
Gambar 2.22 Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin dengan Sudu <i>Semicircular</i> dengan Variasi Jumlah Sudu dan Tingkat	18
Gambar 2.23 Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin dengan Sudu <i>Twisted</i> dengan Variasi Jumlah Sudu dan Tingkat	18

Gambar 2.24 Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin dengan Dua Sudu dengan Variasi Geometri Sudu dan Jumlah Tingkat	19
Gambar 2.25 Varian Turbin Angin Sumbu Vertikal	22
Gambar 2.26 Turbin Angin Savonius	24
Gambar 2.27 Jenis Sudu Turbin Angin Savonius Tipe S dan <i>barrel</i>	24
Gambar 2.28 a) Sudu <i>Helical</i> b) Sudu <i>Twisted</i>	25
Gambar 2.29 Kondisi Aliran Udara Akibat Ekstraksi Energi Mekanik Aliran Bebas	26
Gambar 2.30 Grafik Koefisien Daya Terhadap Rasio Kecepatan Aliran Udara	30
Gambar 2.31 Grafik Koefisien Daya Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i>	33
Gambar 3.1 Dimensi Turbin Angin Savonius Dua Sudu	36
Gambar 3.2 Dimensi Turbin Angin Savonius Tiga Sudu	36
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> Turbin Angin Savonius	37
Gambar 3.4 Perbesaran Gambar <i>Meshing</i> Turbin Angin Savonius (a) Dua Sudu, (b) Tiga Sudu, dan (c) Dekat Sudu	38
Gambar 3.5 <i>Boundary Condition</i> Turbin Angin Savonius 2 Sudu	39
Gambar 3.6 <i>Boundary Condition</i> Turbin Angin Savonius 3 Sudu	39
Gambar 3.7 (a) Opsi <i>Rotation Motion</i> dan (b) <i>Body</i> yang Diputar	40
Gambar 3.8 <i>Flowchart</i> Penelitian Umum	42
Gambar 3.9 <i>Flowchart</i> Simulasi Numerik	44
Gambar 4.1 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s	47
Gambar 4.2 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Sudut $\Theta = 90^\circ$	48
Gambar 4.3 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Tiga Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s	49

Gambar 4.4 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Tiga Sudu pada Sudut $\Theta = 60^\circ$	51
Gambar 4.5 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s	52
Gambar 4.6 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Sudut $\Theta = 90^\circ$	53
Gambar 4.7 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Tiga Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s	54
Gambar 4.8 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Dua Sudu Pada Sudut $\Theta = 60^\circ$	55
Gambar 4.9 Grafik Torsi Terhadap Sudut Turbin Angin Savonius Dua Sudu	56
Gambar 4.10 Grafik Torsi Terhadap Sudut Turbin Angin Savonius Tiga Sudu	57
Gambar 4.11 Grafik Torsi Terhadap Kecepatan Angin Turbin Angin Savonius	58
Gambar 4.12 Grafik Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin Turbin Angin Savonius	59

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Energi merupakan suatu kebutuhan yang mendasar bagi kemajuan secara keseluruhan suatu bangsa. Saat ini dunia sedang mengalami krisis energi dan khususnya Indonesia sedang mengalami krisis energi listrik secara nasional. Hal ini terlihat dari beberapa daerah yang seringkali mengalami pemadaman bergilir, bahkan ada pula yg masih belum dialiri listrik. Sumber energi yang kita gunakan untuk menghasilkan listrik sebagian besar berasal dari bahan bakar fosil, yang di mana bahan bakar fosil ini memiliki kerugian, yaitu suatu saat akan habis dan tidak ramah lingkungan. Maka dari itu diperlukan solusi untuk mengatasi keterbatasan ini dengan membangun beberapa pembangkit listrik tenaga terbarukan yang ramah lingkungan.

Potensi pembangkit listrik dengan menggunakan tenaga angin sangat besar, khususnya di wilayah pesisir Indonesia. Kecepatan angin rata-rata di Indonesia adalah 5 m/s, dengan kecepatan ini, listrik yang dihasilkan bisa mencapai 100 kW. Namun karena kondisi geografis Indonesia yang merupakan pertemuan angin, maka hal ini membuat kecepatan angin tidak stabil dan arahnya tidak menentu. Hal ini merupakan suatu masalah bagi pembangunan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia.

Pemanfaatan energi angin di Indonesia khususnya di Jembatan Suramadu dapat dilakukan, karena Jembatan Suramadu memiliki potensi angin yang cukup besar, dikarenakan pengaruh dari angin lokal yang begitu besar. Angin lokal terjadi akibat perbedaan suhu lokal antara sifat fisis daratan dan lautan, contohnya laut mempunyai kapasitas panas yang lebih besar daripada darat, sehingga laut mampu menyimpan panas lebih lama daripada darat dan laut lebih banyak memantulkan sinar matahari daripada darat, energi matahari dapat memasuki laut sampai dalam dengan bantuan arus laut, sedangkan di darat energi

matahari hanya mencapai kedalaman beberapa sentimeter. Turbin angin di Jembatan Suramadu ini dapat dimanfaatkan untuk memberikan daya pada lampu-lampu penerangan Jembatan Suramadu, sehingga menghemat biaya pengeluaran.

Turbin angin Savonius merupakan salah satu turbin angin yang sering digunakan sebagai *core* dalam pembangkit listrik tenaga angin. Kelebihan utama turbin angin ini adalah mampu menerima angin dari segala arah. Penelitian turbin angin Savonius telah banyak dilakukan dan modifikasi yang dilakukan pun berbagai macam bentuknya antara lain, menambah jumlah sudu, memvariasikan *overlap ratio*, mendesain bentuk *bucket*, menambah jumlah *stage*, dan mengubah *aspect ratio*.

Pada penelitian kali ini, penulis akan melakukan studi numerik dengan model mini turbin angin Savonius dengan tipe sudu yang baik, menggunakan variasi 2 sudu dan 3 sudu serta variasi kecepatan angin yang masuk, sehingga didapat nilai torsi dan koefisien daya yang optimum agar dihasilkan energi listrik yang optimum pula.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah penelitian ini adalah :

1. Bagaimanakah mengatasi profil angin yang kurang stabil sehingga mampu dimanfaatkan menjadi sumber energi?
2. Apakah yang menyebabkan perbedaan torsi dan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius 2 sudu dan 3 sudu?

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui kontur aliran angin yang melalui turbin angin Savonius.
2. Mengetahui pengaruh jumlah sudu dalam studi numerik turbin angin tipe Savonius.
3. Menganalisis torsi dan koefisien daya yang dihasilkan dari studi numerik ini.

1.4. BATASAN MASALAH

Pada studi numerik ini terdapat beberapa batasan masalah yang sesuai dengan lingkup penelitian, yaitu :

1. Tipe turbin angin yang digunakan adalah turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu.
2. Studi numerik dilakukan pada penampang dua dimensi.
3. Potongan penampang yang digunakan adalah bagian tengah dari turbin angin Savonius.
4. Aliran fluida diasumsikan *unsteady* dan *incompressible*.
5. Software yang digunakan adalah STAR-CCM+ 9.02.007-R8.
6. Putaran turbin disimulasikan sebagai *rotation motion*.
7. Penyangga atau *support* sudu diabaikan.
8. Data kecepatan angin yang digunakan diasumsikan satu arah yaitu dari arah *inlet*.
9. Aspek meteorologi dan kondisi lingkungan sekitar tidak dibahas secara detail pada pembahasan.
10. Studi numerik tidak mengikutsertakan analisis bahan yang dipakai pada *wind turbine* ini.

1.5. MANFAAT

Manfaat penelitian ini adalah :

1. Menggunakan *software* dalam proses studi numerik ini, sehingga lebih menghemat biaya yang dikeluarkan.
2. Dapat dijadikan referensi untuk membuat desain turbin yang sebenarnya dengan ukuran yang aktual atau untuk membuat desain turbin yang lebih baik.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

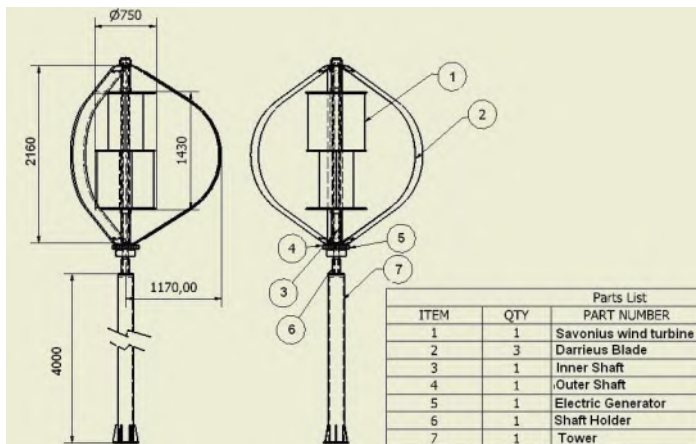
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Dwiyantoro et al (2015)

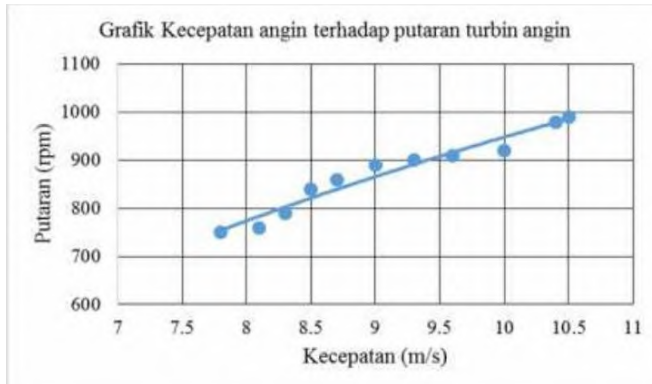
Dwiyantoro et al (2015) melakukan studi eksperimen pada turbin angin Darrieus-Savonius. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik turbin angin Darrieus-Savonius sehingga dapat diketahui desain optimal yang mampu menghasilkan daya.



Gambar 2.1 *Layout* Turbin Angin Darrieus-Savonius (Dwiyantoro et al, 2015)

Gambar 2.1 menunjukkan *layout* turbin angin Darrieus-Savonius di mana dibuat dengan menggabungkan turbin angin Darrieus dan turbin angin Savonius pada satu poros dan lokasi aksial yang sama, seolah-olah turbin angin Savonius berada di dalam turbin angin Darrieus. Kelebihan bentuk seperti ini adalah kemampuan mengekstrak daya yang relatif konsisten pada berbagai macam kondisi angin. Turbin angin Darrieus-Savonius ini memiliki tinggi 2,16 meter dan diameter 2,34 m. Turbin angin Darrieus memiliki 3 buah sudu berbentuk *airfoil* simetri dengan

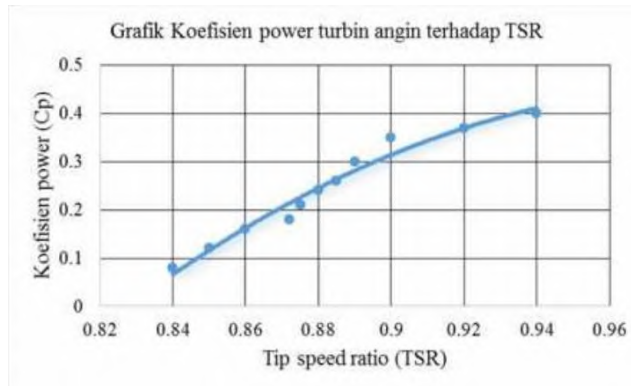
panjang *chord* 10 cm. Turbin angin Savonius memiliki konfigurasi 2 tingkat dan 2 sudu berbentuk setengah lingkaran. *Tower* memiliki ketinggian 4 m dari permukaan tanah dan diameter 14 cm dengan ketebalan 0,8 cm.



Gambar 2.2 Grafik Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin Angin (Dwiyantoro et al, 2015)

Gambar 2.2 menunjukkan hubungan antara kecepatan angin yang mengenai sudu dengan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin. Data didapatkan pada saat turbin angin mulai menghasilkan daya, yaitu pada kecepatan angin di *wind tunnel* 7,5 m/s dengan putaran turbin 742 rpm. Grafik menunjukkan semakin besar kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin maka putaran yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini disebabkan energi yang dimiliki angin berbanding lurus dengan kecepatan angin yang terjadi, sehingga putaran yang terjadi semakin tinggi.

Gambar 2.3 menunjukkan koefisien daya turbin angin meningkat seiring dengan meningkatnya TSR. Hal ini disebabkan karena TSR dipengaruhi oleh kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin, di mana semakin besar kecepatan angin maka TSR semakin besar pula. Turbin angin memiliki koefisien daya maksimum pada TSR 0,95 sebesar 42%.



Gambar 2.3 Grafik Koefisien Daya Turbin Angin Terhadap TSR (Dwiyantoro et al, 2015)

Hasil eksperimen untuk mengetahui karakteristik turbin angin Darrieus-Savonius menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, maka energi yang dihasilkan semakin besar, oleh sebab itu koefisien daya dari turbin angin Darrieus-Savonius semakin meningkat. Desain turbin angin ini mampu menghasilkan daya 500 Watt pada kecepatan angin 7,5 m/s.

2.1.2. Rogowski et al (2015)

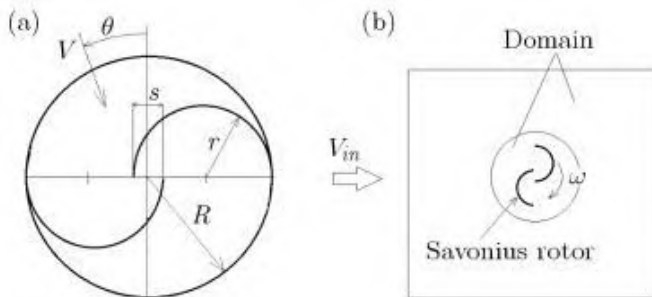
Rogowski et al (2015) melakukan studi numerik pada turbin angin Savonius dua dimensi dengan dua sudu. *Software* yang digunakan adalah ANSYS Fluent 15.0. Penelitian ini berfokus pada perkiraan seberapa besar koefisien torsi dan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius tersebut. Hasil studi numerik ini kemudian divalidasi dengan hasil studi eksperimen serupa yang dilakukan oleh Sandia National Laboratories.

Geometri turbin angin Savonius pada penelitian ini terdiri dari dua sudu dan terdapat *gap* (s) antara dua sudu tersebut. *Gap* didefinisikan sebagai jarak antara kedua ujung sudu pada sisi dalam, yang kemudian berkembang menjadi salah satu parameter pada penelitian ini, yaitu *gap length*. *Gap length* adalah rasio antara *gap* dan diameter sudu yang diekspresikan menjadi s/d.

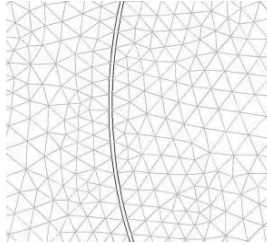
Nilai *gap length* yang divariasikan adalah 0,1 dan 0,2. Sedangkan nilai diameter sudu 0,5 m dibiarkan konstan. Lalu parameter lainnya adalah jari-jari rotor (R) yang divariasikan 0,45 m dan 0,47 m. Tabel 2.1 menunjukkan variasi penelitian yang dilakukan oleh Rogowski et al (2015). *Mesh* pada penelitian ini terdiri dari 41336 *cells* dan 21039 *nodes*. Geometri dan domain turbin angin Savonius disajikan pada gambar 2.4. Pada gambar 2.5 ditunjukkan *mesh* di sekitar sudu turbin.

Tabel 2.1 Variasi Penelitian (Rogowski et al, 2015)

Parameter	Nilai
<i>Blade diameter, d</i>	0,5 m
<i>Gap width ratio, s/d</i>	0,1 & 0,2
<i>Rotor diameter, r</i>	0,45 m & 0,47 m

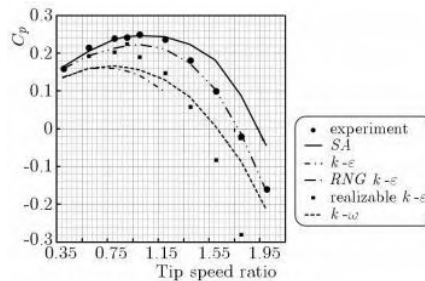


Gambar 2.4 Geometri dan Domain Turbin Angin Savonius (Rogowski et al, 2015)



Gambar 2.5 Mesh di Sekitar Sudu Turbin (Rogowski et al, 2015)

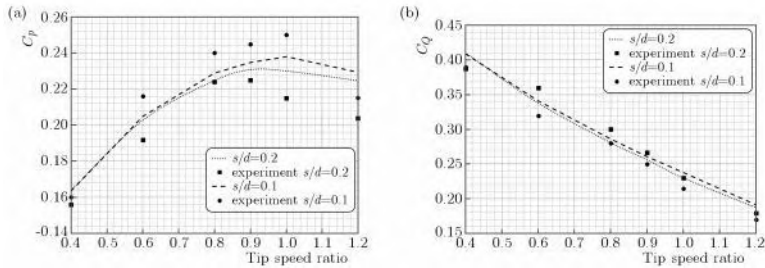
Pada penelitian ini, masing-masing *turbulence model* digunakan untuk membandingkan hasil yang terdekat dengan hasil eksperimen. Pada langkah selanjutnya digunakan *turbulence model* Spalart Allmaras, karena model ini memiliki akurasi yang baik pada *tip speed ratio* rendah (0 hingga 0,8) ketika dibandingkan dengan hasil eksperimen. Gambar 2.6 menunjukkan grafik antara koefisien daya terhadap *tip speed ratio* pada masing-masing *turbulence model*.



Gambar 2.6 Grafik Koefisien Daya Terhadap *Tip Speed Ratio* (*Turbulence Model*) (Rogowski et al, 2015)

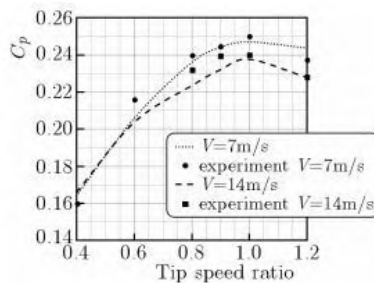
Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah *gap length* yang bernilai 0,1 memiliki koefisien daya lebih tinggi dibandingkan *gap length* yang bernilai 0,2. Kemudian hasil pada koefisien torsi yang lebih tinggi dicapai ketika *gap length* bernilai 0,1 pula. Gambar 2.7 menunjukkan grafik antara koefisien daya

terhadap *tip speed ratio* dengan *gap length* 0,1 dan 0,2 pada hasil eksperimen dan numerik.



Gambar 2.7 Grafik Koefisien Daya Terhadap *Tip Speed Ratio* (*Gap Length*) (Rogowski et al, 2015)

Pada kecepatan angin yang berbeda, didapatkan hasil koefisien daya yang lebih tinggi ketika kecepatan angin bernilai 7 m/s. Gambar 2.8 menunjukkan grafik antara koefisien daya terhadap tip speed ratio dengan kecepatan angin 7 m/s dan 14 m/s.

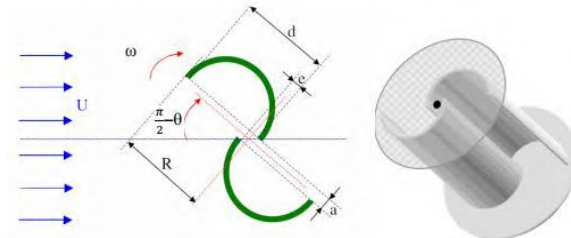


Gambar 2.8 Grafik Koefisien Daya Terhadap *Tip Speed Ratio* (Kecepatan Angin) (Rogowski et al, 2015)

2.1.3. Menet et al (2013)

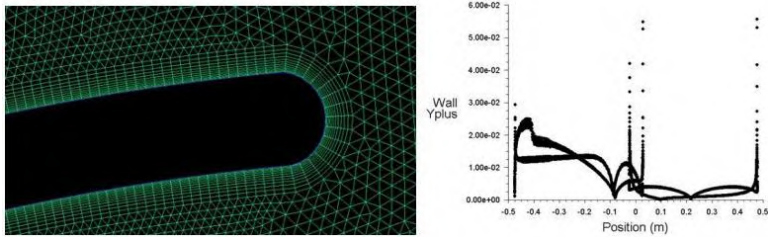
Menet et al (2013) melakukan studi numerik tentang perilaku statis dan dinamis pada turbin angin Savonius. *Software* yang digunakan adalah ANSYS Fluent 6.3. Penulis ingin mengetahui tentang perilaku statis yang berupa torsi statis, karena

turbin angin Savonius memiliki karakteristik utama yaitu mampu bekerja pada kecepatan angin rendah apapun arah mata anginnya. Lalu penulis ingin mengetahui pula perilaku dinamis yang berupa koefisien torsi. Hasil studi numerik ini divalidasi dengan hasil studi eksperimen serupa yang dilakukan oleh Blackwell (1977). Gambar 2.9 menunjukkan geometri turbin angin Savonius yang akan diteliti. Turbin angin Savonius ini terdiri dari jari-jari rotor (R) yang memiliki nilai 0,45 m; diameter sudu (d) yang memiliki nilai 0,5 m; dan rasio celah antar sudu dengan diameter sudu (e/d). Kecepatan angin ditentukan 7 m/s, yang berarti Bilangan Reynolds adalah $4,32 \times 10^5$.

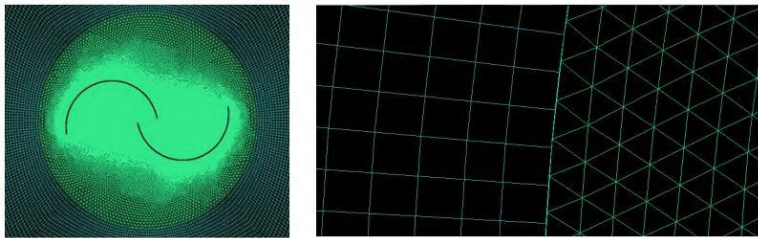


Gambar 2.9 Geometri Turbin Angin Savonius (Menet et al, 2013)

Skema yang digunakan adalah Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) dengan diskretisasi *second order*. Setelah mencapai konvergensi, didapatkan nilai $y^+ = yu/v$ kurang dari 15, di mana y adalah jarak antara *grid* pada *wall*, u adalah tegangan geser, dan v adalah viskositas kinematik. *Mesh* sudu turbin ditunjukkan pada gambar 2.10 dan 2.11.



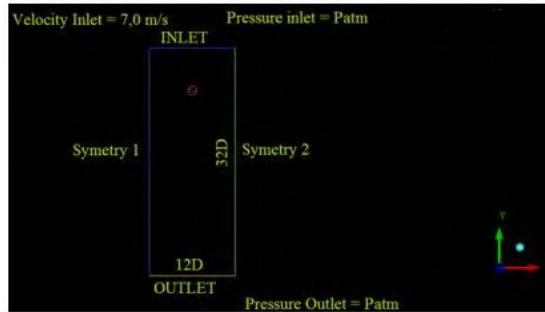
Gambar 2.10 *Mesh* dan y^+ pada Sudu Turbin (Menet et al, 2013)



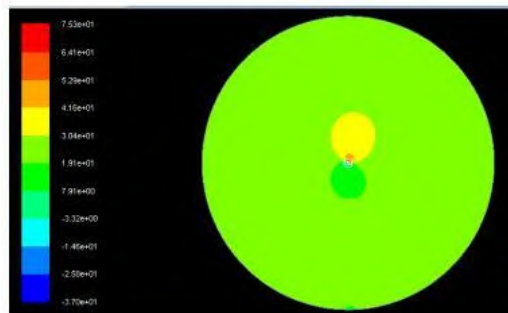
Gambar 2.11 *Mesh* dan Batas *Domain* (Menet et al, 2013)

Mesh pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu *moving domain* dan *exterior domain*. Kedua *domain* ini dipisahkan oleh *interface*. Tipe *cell* pada *moving domain* adalah *triangular* dan pada *exterior domain* adalah *quadrilateral*. *Turbulence model* yang dipakai adalah $k-\omega$ SST. Gambar 2.12 menunjukkan *boundary condition* yang ditetapkan oleh Menet et al (2013).

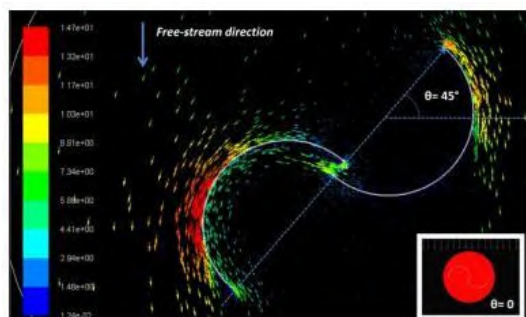
Hasil yang didapat pada perilaku statis adalah kontur tekanan statis, *flow field*, dan grafik koefisien torsi. Hasilnya dapat dilihat pada gambar 2.13, 2.14, dan 2.15. Hal ini berarti rotor turbin angin bisa *start* berapa pun posisi sudutnya dan pernyataan ini sesuai dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Blakcwell.



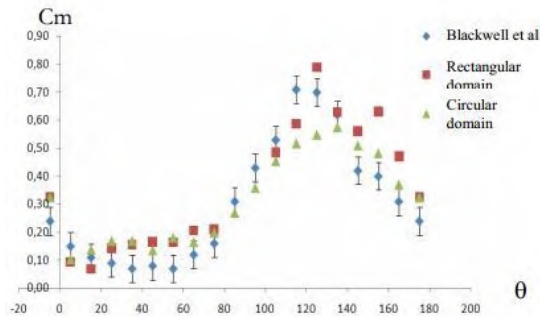
Gambar 2.12 *Boundary Condition* (Menet et al, 2013)



Gambar 2.13 *Static Pressure Field* (Menet et al, 2013)

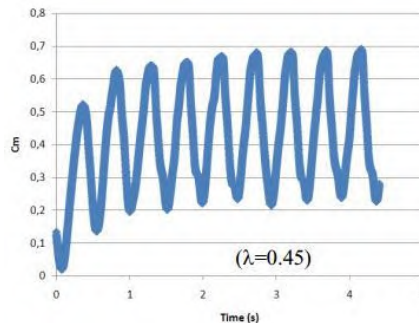


Gambar 2.14 *Flow Field* pada Sudut $\Theta = 45^\circ$ (Menet et al, 2013)

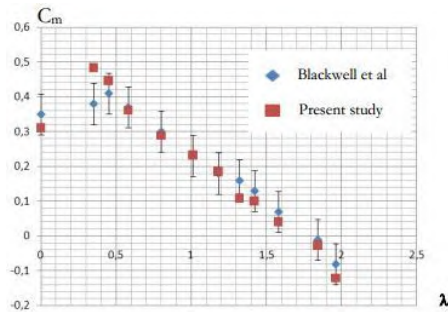


Gambar 2.15 Grafik Koefisien Torsi Statis Terhadap Sudut Angin (Menet et al, 2013)

Pada perilaku dinamis koefisien torsi dihitung selama 5 detik. Setelah beberapa putaran, dapat dilihat bahwa koefisien torsi mencapai nilai rata-rata konstan. Gambar 2.16 menunjukkan grafik perkembangan koefisien torsi terhadap waktu. Grafik koefisien torsi terhadap *tip speed ratio* yang didapatkan sesuai dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Blackwell. Nilai koefisien torsi maksimum didapatkan ketika *tip speed ratio* bernilai 0,45. Sedangkan nilai koefisien daya maksimum dicapai ketika *tip speed ratio* bernilai 1. Gambar 2.17 menunjukkan grafik koefisien daya terhadap *speed ratio*.



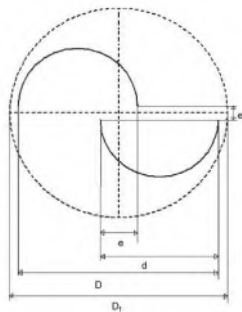
Gambar 2.16 Grafik Koefisien Torsi Terhadap Waktu (Menet et al, 2013)



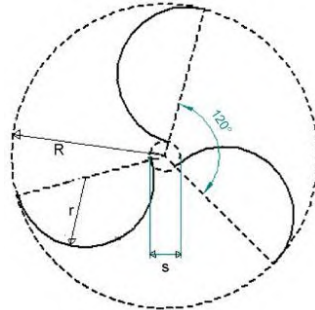
Gambar 2.17 Grafik Koefisien Torsi Terhadap *Speed Ratio* (Menet et al, 2013)

2.1.4. Saha et al (2008)

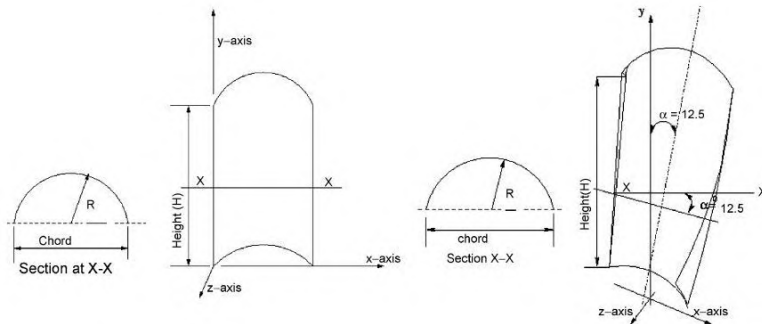
Saha et al (2008) melakukan uji eksperimen untuk menguji performa rotor turbin angin Savonius dengan berbasis pada jumlah tingkat, jumlah sudu, dan geometri sudu. Gambar 2.18, 2.19, dan 2.20. berturut-turut menunjukkan geometri turbin angin Savonius dua sudu, tiga sudu, dan geometri sudu yang diteliti oleh Saha et al (2008).



Gambar 2.18 Geometri Turbin Angin Savonius Dua Sudu (Saha et al, 2008)



Gambar 2.19 Geometri Turbin Angin Savonius Tiga Sudu (Saha et al, 2008)

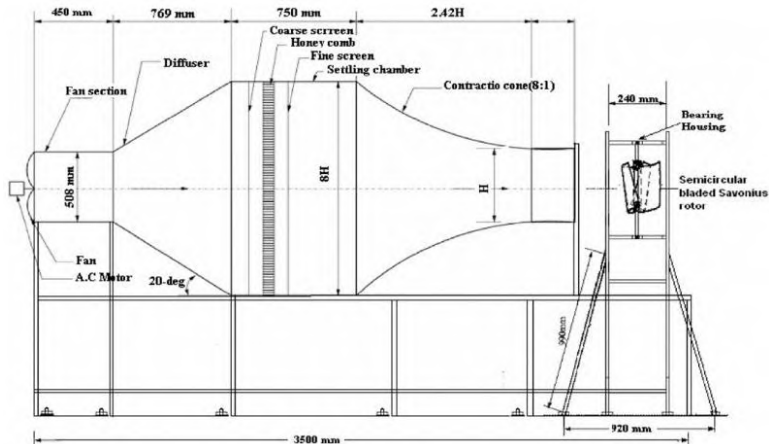


Gambar 2.20 Geometri Sudu (*Semicircular* dan *Twisted*) (Saha et al, 2008)

Tujuan uji eksperimen ini adalah untuk mempelajari performa rotor dengan variasi 1, 2, dan 3, tingkat; 2 dan 3 sudu; dan menggunakan sudu *semicircular* dan *twisted*. Lalu membandingkan koefisien daya tiap variasi. Kemudian dilakukan optimasi konfigurasi rotor berdasarkan jumlah tingkat, jumlah sudu, dan geometri sudu.

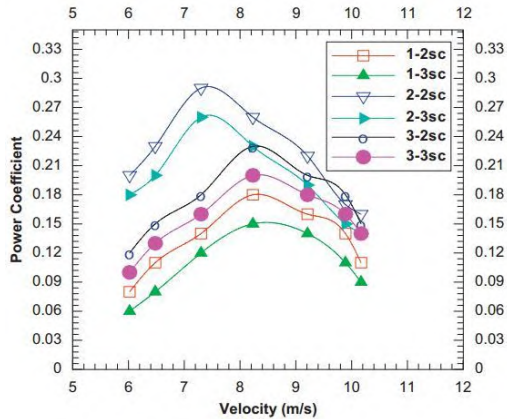
Uji eksperimen ini dilakukan di *low speed wind tunnel* yang ditunjukkan pada gambar 2.21. Rotor ditaruh sejauh 205 mm dari *exit wind tunnel* yang memiliki *cross-section area* sebesar 375 mm x 375 mm. Kecepatan angin diatur pada rentang 6 hingga 10

m/s. Hasil yang didapatkan pada uji eksperimen ini adalah grafik koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan berbagai konfigurasi yang dipilih.

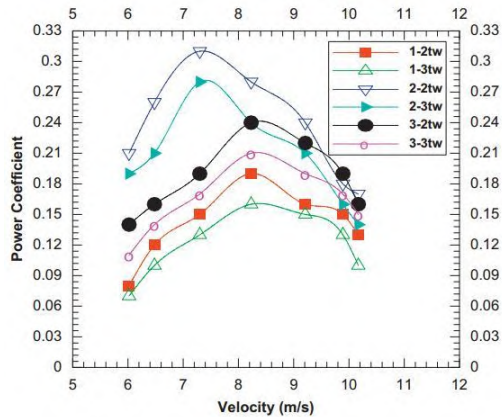


Gambar 2.21 Low Speed Wind Tunnel (Saha et al, 2008)

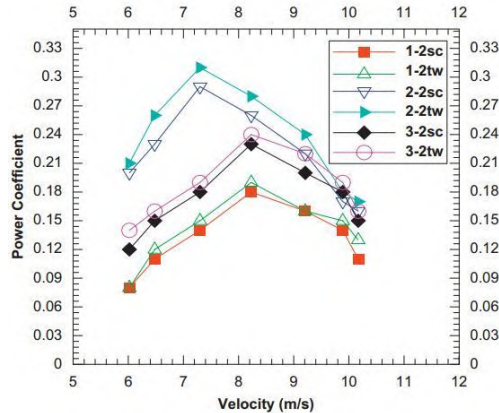
Pada rotor sudu *semicircular* dengan variasi jumlah tingkat dan sudu, didapatkan koefisien daya terbesar dimiliki oleh rotor dua tingkat dan dua sudu, sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.22. Pada rotor sudu *twisted* dengan variasi jumlah tingkat dan sudu, didapatkan koefisien daya terbesar dimiliki oleh rotor dua tingkat dan dua sudu, sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.23. Lalu bisa dilihat sudu *twisted* menunjukkan koefisien daya yang lebih baik apabila dibandingkan dengan sudu *semicircular*, dengan variasi hanya jumlah tingkat yang ditunjukkan oleh gambar 2.24. Hal ini disebabkan oleh gaya maksimal sudu *twisted* lebih besar yang dihasilkan oleh lengan momen yang lebih panjang.



Gambar 2.22 Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin dengan Sudu *Semicircular* dengan Variasi Jumlah Sudu dan Tingkat (Saha et al, 2008)



Gambar 2.23 Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin dengan Sudu *Twisted* dengan Variasi Jumlah Sudu dan Tingkat (Saha et al, 2008)



Gambar 2.24 Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin dengan Dua Sudu dengan Variasi Geometri Sudu dan Jumlah Tingkat (Saha et al, 2008)

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Energi Angin

Energi angin merupakan energi alternatif yang mempunyai prospek bagus ke depannya karena merupakan sumber energi yang bersih dan terbarukan. Pada dasarnya energi angin terjadi karena ada perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Di daerah khatulistiwa, udaranya menjadi panas, mengembang dan menjadi ringan, lalu naik ke atas dan bergerak ke daerah yang lebih dingin. Sebaliknya daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun ke bawah. Dengan demikian terjadi suatu perputaran udara berupa perpindahan udara dari kutub utara ke garis khatulistiwa menyusuri permukaan bumi dan sebaliknya suatu perpindahan udara dari garis khatulistiwa kembali ke kutub utara melalui lapisan udara yang lebih tinggi.

2.2.2. Potensi Tenaga Angin

Proses pemanfaatan energi angin dilakukan melalui dua tahapan konversi energi, pertama aliran angin akan menggerakkan rotor (baling-baling) yang menyebabkan rotor

berputar selaras dengan angin yang bertiup, kemudian putaran dari rotor dihubungkan dengan generator, dari generator inilah dihasilkan arus listrik. Jadi proses tahapan konversi energi bermula dari energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor kemudian menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah sebagai berikut :

1. Rotor (kincir), rotor turbin sangat bervariasi jenisnya, diameter rotor akan berbanding lurus dengan daya listrik. Semakin besar diameter semakin besar pula listrik yang dihasilkan, sudu dengan jumlah berkisar antara 2-6 buah lebih banyak digunakan.
2. Kecepatan angin, kecepatan angin akan mempengaruhi kecepatan putaran rotor yang akan menggerakkan generator.
3. Jenis generator, generator terbagi dalam beberapa karakteristik yang berbeda, generator yang cocok untuk Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) adalah generator yang dapat menghasilkan arus listrik pada putaran rendah.

Listrik yang dihasilkan dari Sistem Konversi Energi Angin akan bekerja optimal pada siang hari di mana angin berhembus cukup kencang dibandingkan dengan malam hari, sedangkan penggunaan listrik biasanya akan meningkat pada malam hari. Untuk mengantisipasinya, sistem ini sebaiknya tidak langsung digunakan untuk keperluan produk-produk elektronik, namun terlebih dahulu disimpan dalam satu media seperti baterai atau aki sehingga listrik yang keluar besarnya stabil dan bisa digunakan kapan saja. Syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan kincir angin dan jari-jari 1 meter dapat dilihat seperti pada tabel 2.2. Klasifikasi angin pada kelompok 3 adalah batas minimum dan angin pada kelompok 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Perhitungan Potensi Energi Angin secara matematis berdasarkan rumus sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times A \times v^3$$

dengan :

P = potensi energi angin (watt day/year)

C_p = koefisien daya

ρ = kerapatan udara rata-rata (kg/m³)

A = luas sapuan rotor (m²)

v = kecepatan angin rata-rata harian (m/s)

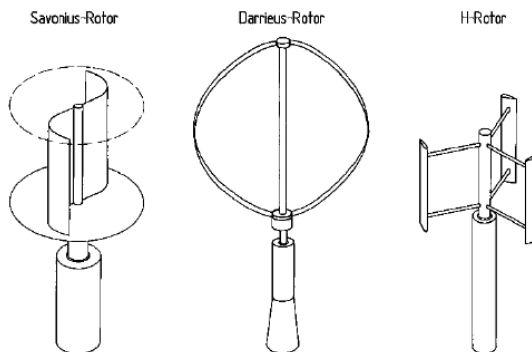
Tabel 2.2 Tingkatan Kecepatan Angin 10 meter di atas Permukaan Tanah (World Wind Energy Association, 2007)

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah		
Kelas	Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
1	0,00 – 0,02	-----
2	0,3 – 1,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 – 3,3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3,4 – 5,4	Wajah terasa ada angin, daun2 bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5,5 – 7,9	Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8,0 – 10, 7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10,8 – 13,8	Ranting pohon besar bergoyang, air plumpang berombak kecil
8	13,9 – 17,1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17,2 – 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20,8 – 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24,5 – 28,4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28,5 – 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 – 36,9	Tornado

2.2.3. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin angin yang pertama kali dibuat oleh manusia. Pada awalnya putaran rotornya hanya memanfaatkan efek Magnus yaitu efek yang terjadi karena adanya selisih gaya *drag* pada kedua sisi rotor sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Satu di antara contoh turbin angin sumbu vertikal jenis *drag* adalah turbin angin Savonius, terdiri dari dua atau tiga lembar pelat yang dilengkungkan pada arah tangensial yang sama terhadap sumbu putar. Jenis turbin angin VAWT mempunyai poros yang tegak lurus dengan tanah.

Turbin angin sumbu vertikal modern menerapkan bentuk yang aerodinamis pada rotornya untuk menghasilkan momen gaya. Contohnya adalah turbin angin Darrieus. Pada turbin angin Darrieus, sudu dibentuk melengkung dan berputar menyapu ruangan seperti tali yang berputar pada sumbu vertikal. Hal ini menyebabkan bentuk geometri sudunya rumit dan sulit untuk dibuat. Rotor turbin angin Darrieus pada umumnya terdiri atas dua atau tiga sudu. Variasi dari turbin angin Darrieus adalah yang disebut dengan Turbin angin H. Tersusun dari dua atau tiga sudu lurus yang dihubungkan dengan struktur rangka ke poros. Gambar 2.25 menunjukkan varian turbin angin sumbu vertikal.



Gambar 2.25 Varian Turbin Angin Sumbu Vertikal

Keuntungan menggunakan turbin angin jenis VAWT antara lain :

1. Dapat mengkonversi energi angin dari segala arah
2. Dapat mengkonversi energi angin yang tidak stabil kecepatannya
3. Saat beroperasi tidak bising
4. Desainnya sederhana dan ringan.

Sedangkan kelemahan menggunakan turbin angin jenis VAWT antara lain :

1. Kecepatan angin sangat rendah ketika di dekat permukaan tanah, sehingga kecepatan angin akan sangat rendah pada bagian bawah rotor.
2. Mesin tidak dapat di-*start* langsung, misalnya mesin Darrieus membutuhkan *push* sebelum dimulai.
3. Mesin mungkin perlu kabel penahan untuk menahan sistem, tapi kabel penahan tidak praktis di daerah pertanian.

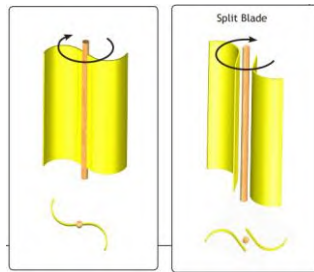
Namun demikian, untuk mengatasi kelemahan diatas, sampai sekarang ini masih banyak dilakukan penelitian-penelitian yang menghasilkan penemuan baru. Sebab bagaimanapun juga khususnya turbin angin kecil masih banyak berfungsi atau digunakan, diantaranya untuk :

1. Pengisian baterai untuk perangkat energi yang rendah seperti pencahayaan, radio, televisi, *wifi*, dan lain-lain.
2. Memasok daya ke lokasi terpencil seperti kapal pesiar dan lokakarya.
3. Mempertahankan listrik untuk pagar hewan, budidaya ikan, pompa air, stasiun meteorologi, unit *repeater* radio, dan lain-lain.

2.2.4. Turbin Angin Savonius

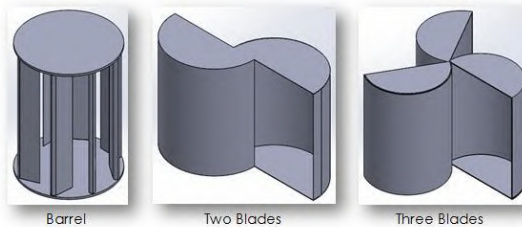
Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin VAWT. Turbin ini dikembangkan dengan desain yang memungkinkan turbin dapat menangkap angin dari arah mana

saja untuk memutarnya. Turbin angin Savonius adalah jenis turbin dengan desain paling sederhana. Perbedaan daya dorong menyebabkan turbin angin Savonius dapat berputar. Permasalahan yang sering timbul pada desain turbin angin Savonius adalah besarnya kecepatan angin yang menghantam permukaan turbin berbeda-beda. Besarnya kecepatan angin di dasar turbin angin Savonius terkadang lebih rendah daripada angin yang menghantam permukaan dinding atas sehingga perputaran turbin menjadi kurang optimal karena sudu turbin angin ini mengarah vertikal ke bawah. Gambar 2.26 menunjukkan turbin angin Savonius.



Gambar 2.26 Turbin Angin Savonius

Terdapat beberapa jenis sudu pada turbin angin Savonius yaitu, tipe *barrel*, tipe *S*, tipe *helical*, dan tipe *twisted* yang ditunjukkan pada gambar 2.27 dan 2.28 berturut-turut menunjukkan jenis sudu turbin angin Savonius.



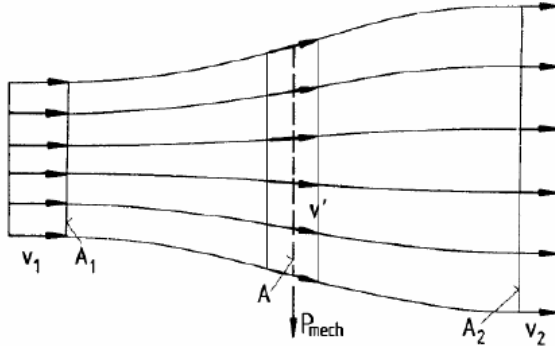
Gambar 2.27 Jenis Sudu Turbin Angin Savonius



Gambar 2.28 a) Sudu *Helical* b) Sudu *Twisted*

2.2.5. Teori Betz

Teori Betz berdasarkan pada pemodelan aliran angin dua dimensi yang mengenai rotor yang menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor yang dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan oleh sebagian energi kinetik angin yang diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Walaupun teori Betz telah mengalami penyederhanaan, namun teori ini cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversi menjadi bentuk energi lainnya. Gambar 2.29 menunjukkan kondisi aliran udara akibat ekstraksi energi mekanik aliran bebas.



Gambar 2.29 Kondisi Aliran Udara Akibat Ekstraksi Energi Mekanik Aliran Bebas

Pertama dengan menganggap bahwa kecepatan udara yang melalui penampang A adalah sebesar v , maka aliran volume udara yang melalui penampang rotor pada setiap satuan waktu adalah,

$$V = vA$$

di mana :

- V = laju volume udara (m^3/s)
- v = kecepatan angin (m/s)
- A = luas area sapuan rotor (m^2)

dengan demikian, laju aliran massa dapat dirumuskan dengan persamaan,

$$\dot{m} = \rho vA = \text{constant}$$

di mana :

- ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

Hal ini menyatakan bahwa laju aliran massa selalu konstan sepanjang aliran. Lalu dilanjutkan dengan persamaan gaya pada rotor yang dikenai angin,

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \dot{m} \Delta v = \rho A v (v_1 - v_2)$$

di mana :

$$\begin{aligned} v_1 &= \text{kecepatan angin di daerah } \textit{upstream} \\ v_2 &= \text{kecepatan angin di daerah } \textit{downstream} \end{aligned}$$

Energi atau kerja yang disebabkan oleh angin dapat dituliskan,

$$dE = Fdx$$

Kemudian didapatkan persamaan daya akibat aliran angin yang terjadi,

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = Fv$$

Lalu substitusi gaya (F) dengan persamaan sebelumnya, didapatkan,

$$P = \rho Av^2(v_1 - v_2)$$

Persamaan yang menyatakan daya akibat perubahan energi kinetik adalah,

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2}{\Delta t} = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2)$$

Menggunakan persamaan kontinuitas, daya (P) dapat dituliskan kembali menjadi,

$$P = \frac{1}{2}\rho Av(v_1^2 - v_2^2)$$

Menggabungkan persamaan ini dengan persamaan daya sebelumnya, didapatkan,

$$\rho Av^2(v_1 - v_2) = \frac{1}{2}\rho Av(v_1^2 - v_2^2)$$

Kemudian disederhanakan menjadi,

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa kecepatan angin pada rotor dapat diasumsikan sebagai kecepatan rata-rata dari kecepatan angin di daerah *upstream* (v_1) dan kecepatan angin di daerah *downstream* (v_2). Persamaan gaya (F) dan daya (P) selanjutnya, dengan memasukkan persamaan nilai kecepatan angin yang baru (v), akan menjadi,

$$\begin{aligned} F &= \rho A v (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \\ P &= \rho A v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2)^2 (v_1 - v_2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \end{aligned}$$

Lalu didapatkan *downstream velocity factor* (b), yaitu rasio antara kecepatan *downstream* dan *upstream*, sebagai berikut,

$$b = \frac{v_2}{v_1}$$

Dengan memasukkan persamaan *downstream velocity factor* (b), maka persamaan gaya (F) dan daya (P) berubah menjadi,

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \rho A v_1^2 (1 - b^2) \\ P &= \frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1 - b^2) (1 + b) \end{aligned}$$

Persamaan energi kinetik angin atau daya total yang melintasi aliran *upstream*, dengan $v = v_1$ dan melewati luas penampang A, dapat dituliskan,

$$W = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

Koefisien daya adalah persamaan tak berdimensi yang menyatakan rasio antara daya yang dapat digunakan terhadap daya total yang melewati penampang rotor,

$$C_p = \frac{P}{W}$$

Koefisien daya juga menyatakan efisiensi yang dapat dicapai oleh suatu turbin angin, dengan memasukkan persamaan daya (P) dan energi kinetik (W), maka akan diperoleh,

$$C_p = \frac{P}{W} = \frac{\frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1 - b^2)(1 + b)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b)$$

Apabila dimasukkan nilai $b = 1$, $v_1 = v_2$, dan aliran angin diabaikan, maka koefisien daya bernilai nol. Namun apabila $b = 0$, $v_1 = 0$, maka koefisien daya bernilai 0,5. Koefisien daya maksimal bisa dicapai dengan menggunakan konsep diferensial agar didapat nilai *downstream velocity factor* (b) yang optimal pula, persamaannya menjadi,

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} \frac{d}{db} [(1 - b^2)(1 + b)]$$

$$0 = \frac{1}{2} [(1 - b^2) - 2b(1 + b)]$$

$$0 = \frac{1}{2} (1 - b^2 - 2b - 2b^2)$$

$$0 = \frac{1}{2} (1 - 3b^2 - 2b)$$

$$0 = \frac{1}{2} (1 - 3b(1 + b))$$

Dari persamaan ini didapatkan,

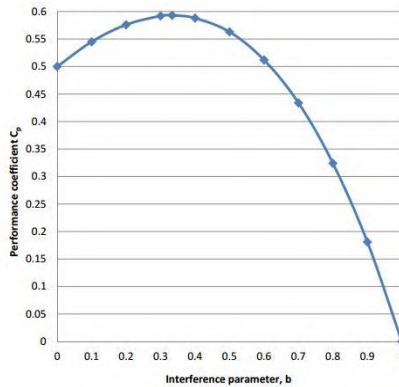
$$b = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \rightarrow v_2 = \frac{1}{3} v_1$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa untuk mencapai operasi yang optimal, maka *downstream velocity factor* (b) harus bernilai 1/3 atau v_2 bernilai sepertiga dari v_1 . Memakai persamaan ini, didapat koefisien daya sebagai berikut,

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - b^2)(1 + b) = \frac{1}{2}\left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right)\left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27}$$

$$= 0,59259 = 59,26\%$$

Nilai koefisien daya yang didapatkan ini disebut sebagai *Betz Limit*. Nilai ini adalah daya teoritis maksimum yang dapat dimanfaatkan yang diperoleh dari aliran angin ideal. Gambar 2.30 menunjukkan grafik koefisien daya terhadap rasio kecepatan aliran udara.



Gambar 2.30 Grafik Koefisien Daya Terhadap Rasio Kecepatan Aliran Udara (Carriveau, 2011)

2.2.6. Torsi & Koefisien Daya

Koefisien daya adalah hal penting dalam merancang turbin angin karena menunjukkan berapa besar energi angin yang dapat diekstraksi dari energi kinetik angin yang melalui penampang rotor. Koefisien daya sangat mempengaruhi kinerja turbin angin, dan dipengaruhi oleh konstruksi turbin angin dan prinsip konversi energinya. Nilai koefisien maksimum secara teoritis adalah 59,26% atau sama dengan *Betz Limit*. Koefisien daya bisa didapatkan dari nilai koefisien torsi yang didefinisikan sebagai rasio antara nilai torsi yang dihasilkan oleh rotor dan torsi teoritis angin,

$$C_T = \frac{\text{rotor torque}}{\text{wind torque}} = \frac{T}{T_w} = \frac{I\alpha}{\frac{1}{4}\rho A d v^2}$$

di mana,

I = momen inersia rotor (kg.m^2 atau N.m.s^2)

α = percepatan sudut rotor (rad/s^2)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

A = luas penampang rotor (m^2)

d = diameter satu sudu (m)

v = kecepatan angin (m/s)

Salah satu aplikasi dari nilai koefisien torsi adalah ketika akan melakukan pengujian pada rotor yang telah terhubung oleh *gearbox* dan generator. Koefisien lain yang dapat mengukur performa turbin angin adalah koefisien torsi statis. Koefisien ini didefinisikan sebagai torsi yang mengukur kemampuan *self starting* turbin angin dan didapatkan ketika rotor berada pada posisi diam.

$$C_{Ts} = \frac{\text{rotor static torque}}{\text{wind torque}} = \frac{T_s}{T_w} = \frac{I\alpha}{\frac{1}{4}\rho A d v^2}$$

Koefisien daya yang menjadi acuan performa turbin angin Savonius memiliki persamaan sebagai berikut,

$$C_{power} = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = C_T \lambda$$

2.2.7. Tip Speed Ratio

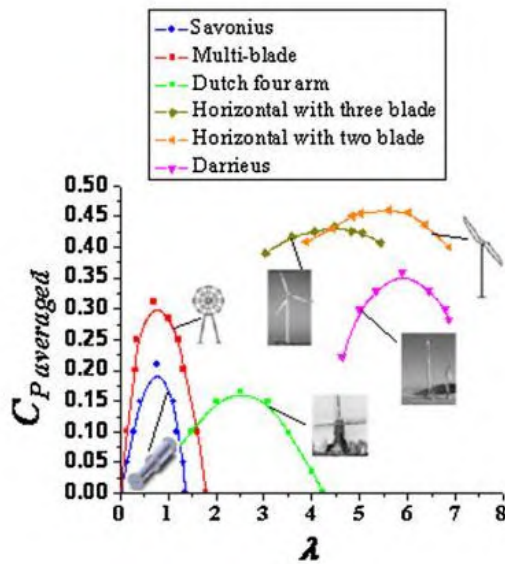
Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. TSR juga dapat dilambangkan dengan λ . Secara perumusan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\lambda = TSR = \frac{u}{v} = \frac{\omega r}{v}$$

di mana :

λ	= <i>tip speed ratio</i>
u	= kecepatan turbin (m/s)
ω	= putaran turbin (rpm)
r	= jari-jari rotor
v	= kecepatan angin (m/s)

Karena setiap turbin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka koefisien daya pun juga dipengaruhi oleh *tip speed ratio*. Apabila turbin angin memiliki grafik yang hampir mendekati Betz *Limit*, maka koefisien daya yang dimiliki akan semakin tinggi begitu pula dengan efisiensi. Semakin luas daerah di bawah grafik pada gambar 2.31 menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, maka semakin besar pengaruhnya terhadap sudu turbin. Jadi turbin tersebut mampu memanfaatkan kecepatan angin yang tinggi untuk dikonversi menjadi putaran turbin yang juga semakin tinggi. Titik mulai grafik menunjukkan bahwa turbin angin mulai bekerja pada nilai TSR tertentu. Jika titik mulai berada pada TSR rendah maka turbin tersebut mampu bekerja pada kecepatan angin rendah. Selain itu secara umum pada grafik tiap turbin juga ditunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya TSR hal ini tidak serta merta akan meningkatkan koefisien daya (C_p). Pada saat tertentu saja koefisien daya (C_p) akan berada pada posisi maksimum. Gambar 2.31 menunjukkan grafik perbandingan koefisien daya (C_p) terhadap *tip speed ratio* (TSR) pada beberapa jenis turbin angin.



Gambar 2.31 Grafik Koefisien Daya Terhadap *Tip Speed Ratio*
(Akwa, 2012)

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Variasi dan *Domain* Simulasi

3.1.1. Variasi

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan *software* STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Penelitian dengan menggunakan metode numerik mempunyai tiga tahapan utama yaitu *Pre Processing*, *Processing*, dan *Post Processing*. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida.

Model yang dibuat berupa geometri dua dimensi dari turbin angin mini tipe Savonius yang divariasikan jumlah sudu dan kecepatan anginnya. Variasi penelitian ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi Penelitian

Parameter	Nilai
Jumlah Sudu	2 sudu & 3 sudu
Kecepatan Angin	5, 7, 9, 11, 13, & 15 (m/s)

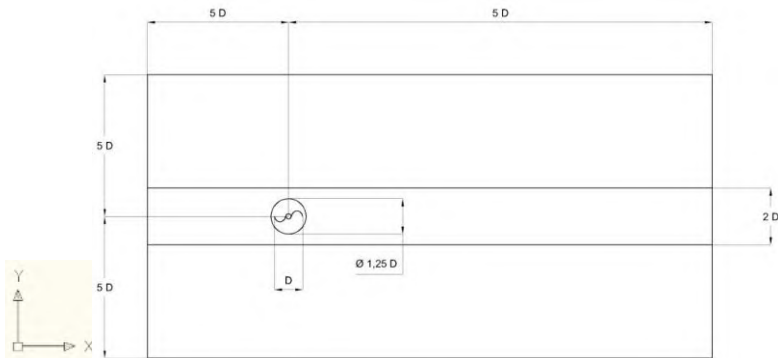
3.1.2. *Domain* Simulasi

Pada studi numerik *domain* simulasi sebisa mungkin harus disesuaikan dengan kondisi dari benda uji dan *test section*. Dalam penelitian ini domain simulasi dibagi menjadi dua, yaitu *static domain* dan *rotating domain*. *Static domain* adalah *domain* terluar yang dilintasi oleh fluida dan *domain* ini tidak bergerak. *Domain* ini ditunjukkan dengan bentuk persegi yang mengelilingi *rotating domain*. *Rotating domain* ditunjukkan dengan bentuk lingkaran yang mengelilingi sudu-sudu dan poros turbin angin Savonius. *Rotating domain* ini akan diperlakukan sebagai *rotation motion* di mana turbin angin berputar dengan *time step* tertentu.

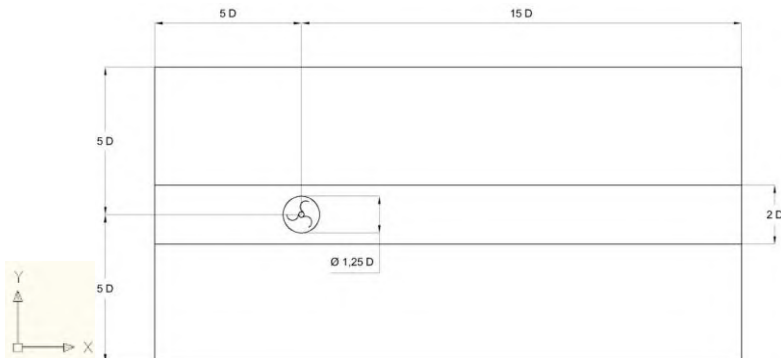
3.2. Tahap Pre Processing

3.2.1. Pembuatan Geometri dan *Meshing*

Pembuatan geometri merupakan proses menggambar model sudu, poros, titik temu antara dua *domain*, dan batas aliran eksternal. Setelah membuat model-model tersebut hal yang dilakukan adalah mendefinisikan tiap bagian atau *face*. Gambar 3.1 dan 3.2 menunjukkan geometri turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu. Diameter rotor ($D = 75 \text{ mm}$) menjadi acuan pada pembuatan geometri, dengan diameter poros 15 mm dan diameter satu sudu 30 mm .

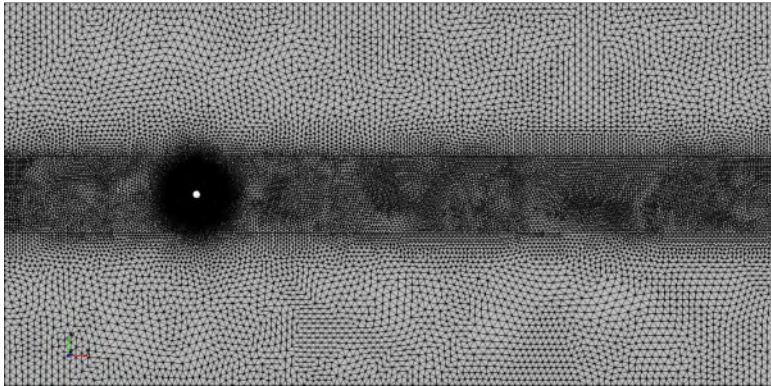


Gambar 3.1 Dimensi Turbin Angin Savonius 2 Sudu

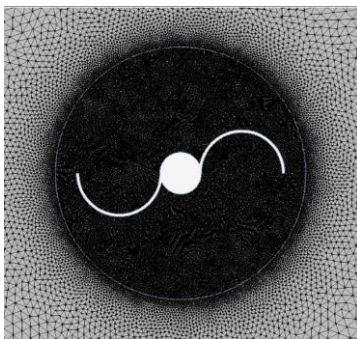


Gambar 3.2 Dimensi Turbin Angin Savonius 3 Sudu

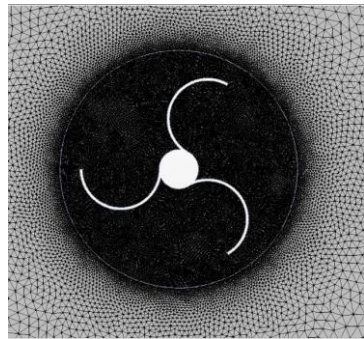
Pembuatan *meshing* adalah membagi geometri yang telah dibuat menjadi elemen-elemen kecil sehingga parameter yang ditentukan dapat diaplikasikan ke dalam setiap elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang dipilih adalah *tetrahedral mesh* dengan operasi *automated mesh*.



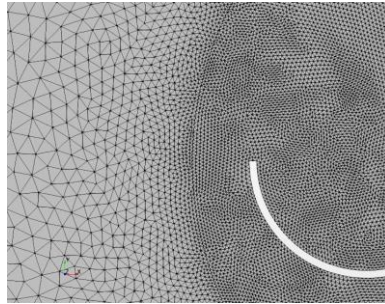
Gambar 3.3 *Meshing* Turbin Angin Savonius



(a)



(b)

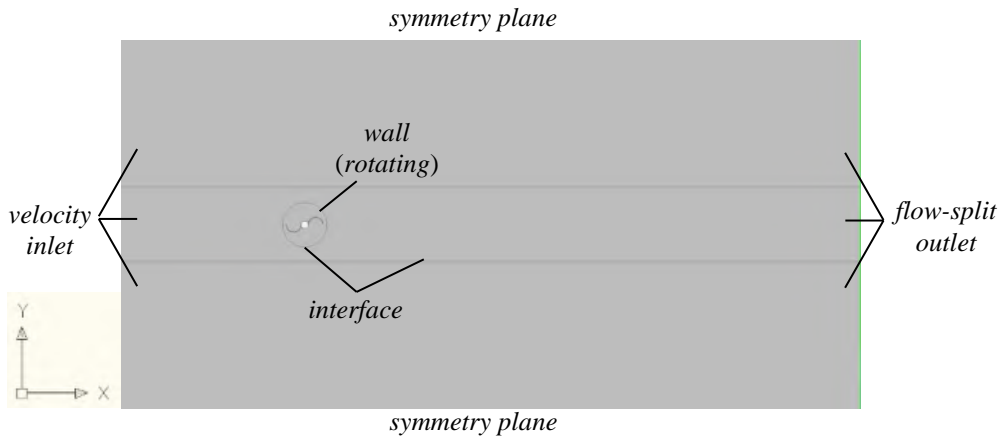


(c)

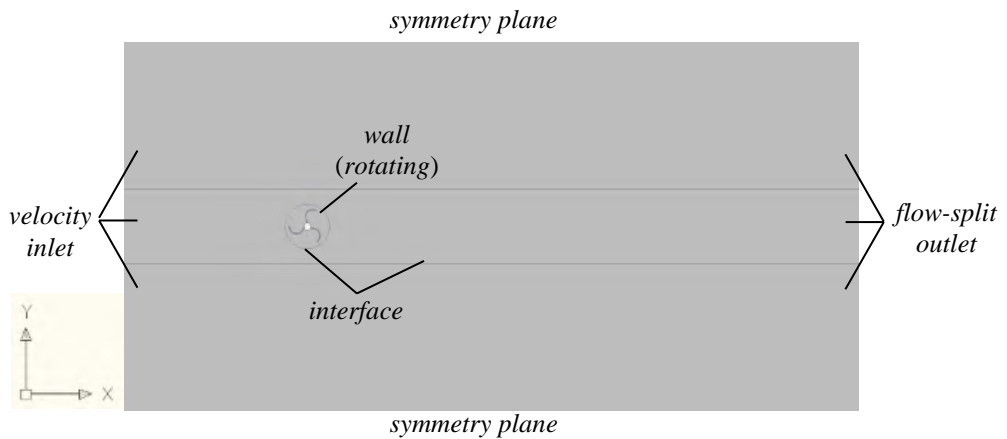
Gambar 3.4 Perbesaran Gambar *Meshing* Turbin Angin Savonius
(a) Dua Sudu, (b) Tiga Sudu, dan (c) Dekat Sudu

3.2.2. *Boundary Condition*

Boundary Condition adalah penentuan batasan-batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji dengan menetapkan *inlet*, *outlet*, *wall*, *interface*, dan lain-lain pada geometri yang telah dibuat, yakni pada sudu, poros, titik temu antara dua *domain*, dan batas aliran eksternal. *Interface* adalah *boundary condition* berupa *wall* yang diatur supaya dapat ditembus oleh aliran fluida. *Boundary condition* pada *inlet* yaitu *velocity inlet* memiliki nilai 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* digunakan *flow-split outlet*. Pada titik temu antara dua *domain* dianalisis sebagai *interface*. Terakhir pada sudu dan poros menggunakan *wall* dengan *rotation motion* seperti ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Boundary Condition Turbin Angin Savonius 2 Sudu



Gambar 3.6 Boundary Condition Turbin Angin Savonius 3 Sudu

3.2.3. Parameter

3.2.3.1. Models

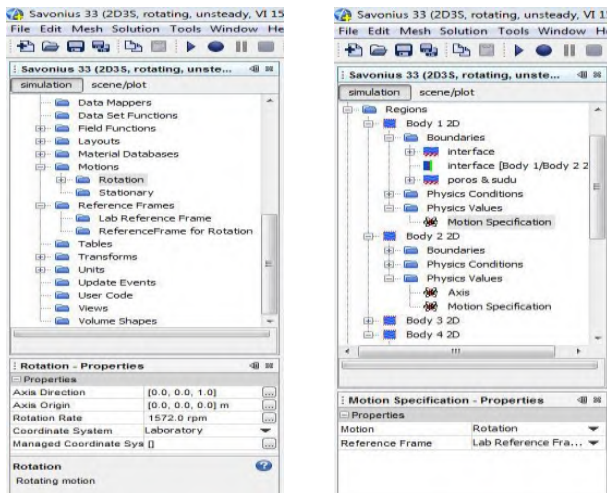
Pada langkah ini pemodelan aliran yang akan digunakan adalah *segregated flow* dengan *turbulence model* k-epsilon *realizable*, di mana model ini dipilih karena memiliki cakupan aplikasi yang luas dan umum digunakan, serta parameter *implicit unsteady* dipilih dengan skema diskretisasi *second order upwind*. Diskretisasi *time step* yang digunakan adalah *second order*.

3.2.3.2. Materials

Pemodelan ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan *density* $1,18415 \text{ kg/m}^3$ (*constant*) dan *dynamic viscosity* $1.85508\text{E-}5 \text{ Pa.s}$ (*constant*).

3.2.3.3. Rotation Motion & Rotating Reference Frame

Turbin diputar dengan mengaplikasikan fitur *rotation* di *subnode motion* di dalam *node tools*, kemudian di bawah *subnode reference frame* akan muncul *subnode referenceframe for rotation*, seperti terlihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 (a) Opsi *Rotation Motion* dan (b) *Body* yang Diputar

Setelah mengaktifkan *rotation motion* seperti pada gambar 3.7a, selanjutnya ditentukan sumbu putar, sumbu *origin*, dan kecepatan putaran pada *body* yang akan diputar. Kemudian pada *subnode body* yang akan diputar pilih opsi *rotation* pada *motion* di *subnode motion specification* seperti pada gambar 3.7b.

3.3. Tahap *Processing*

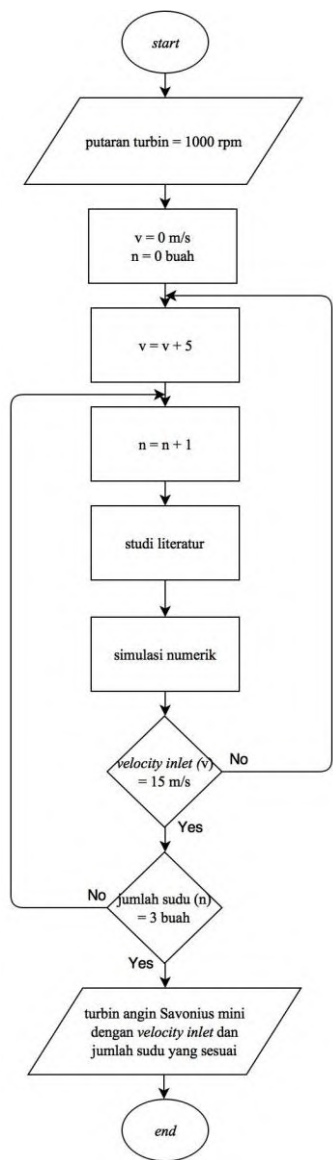
Pada tahap *processing*, parameter-parameter yang telah ditetapkan pada saat *pre processing* akan diiterasi hingga mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan, yakni ketika nilai residual mencapai 10^{-5} , kecuali *continuity* di mana dianggap konvergen ketika residual mencapai 10^{-3} . Jika kriteria konvergensi tercapai, maka langkah selanjutnya adalah tahap *post processing* dan apabila kriteria konvergensi tidak tercapai maka langkah kembali ke tahap pembuatan *meshing*.

3.4. Tahap *Post Processing*

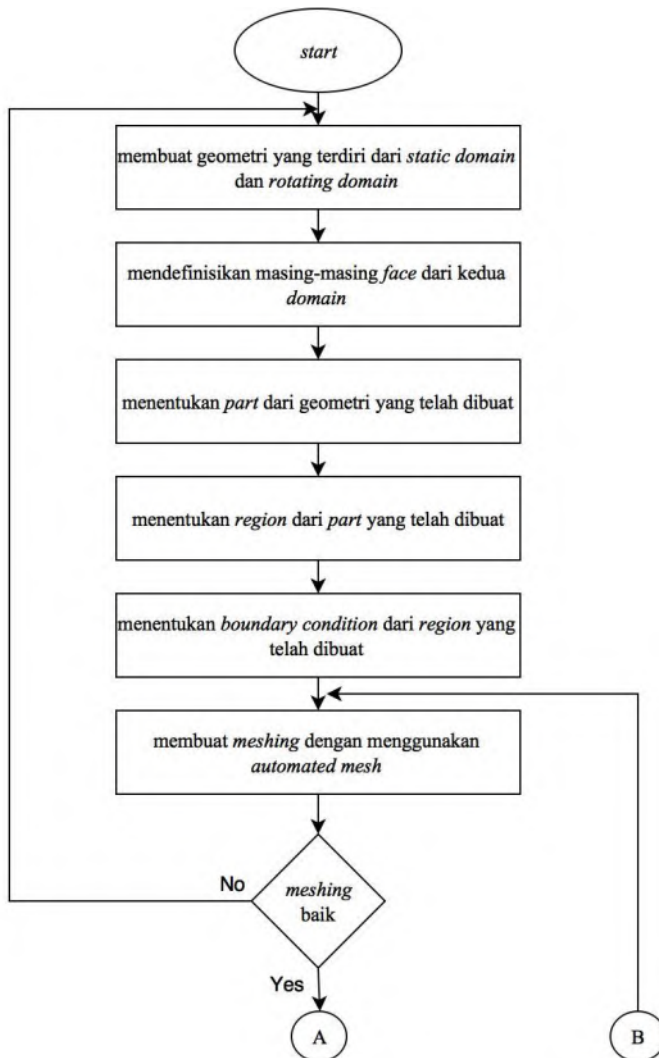
Setelah diperoleh solusi numerik dari tahap *processing*, tahap berikutnya adalah tahap *post processing*, yaitu menganalisis dan memvisualisasikan hasil dari solusi numerik tersebut. Pada tahap ini akan diperoleh data berupa visualisasi aliran, yaitu kontur kecepatan dan tekanan serta berupa grafik, yaitu kurva nilai koefisien torsi dan daya.

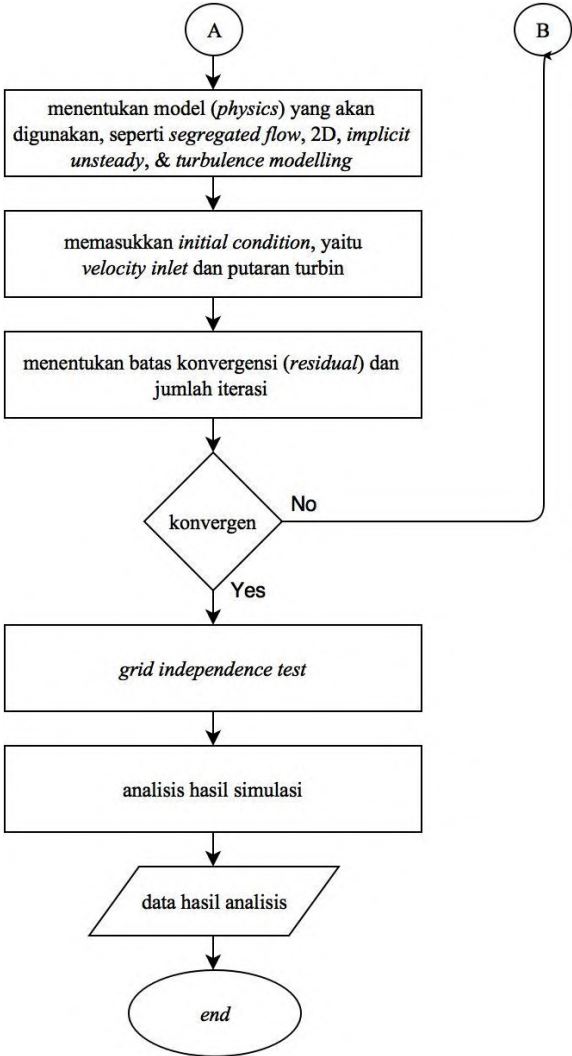
3.5. Diagram Alir

Pada penelitian ini terdapat diagram alir penelitian umum dan diagram alir simulasi numerik yang ditunjukkan sebagai berikut :



Gambar 3.8 Flowchart Penelitian Umum





Gambar 3.9 Flowchart Simulasi Numerik

BAB IV ANALISIS DAN DISKUSI

Bab ini berisi tentang analisis dan diskusi dari hasil simulasi numerik berupa visualisasi aliran, yaitu kontur kecepatan dan tekanan serta berupa grafik, yaitu kurva nilai koefisien torsi dan daya.

4.1. Putaran Turbin dan *Tip Speed Ratio*

Data yang digunakan dalam simulasi ini diadaptasi dari eksperimen Dwiyantoro et al (2015) dengan mengasumsikan putaran yang sama pada kecepatan 9 m/s dan mengekstrapolasi untuk kecepatan angin yang disajikan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data yang Digunakan dalam Simulasi

Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Turbin (rpm)	<i>Tip Speed Ratio</i>
5	440	0,69
7	666	0,75
9	892	0,78
11	1119	0,80
13	1345	0,81
15	1572	0,82

4.2. Time Step

Perhitungan *time step* dilakukan untuk mengetahui berapa besarnya *time step* dalam satu putaran penuh. Pada contoh ini diambil kecepatan angin 13 m/s dengan putaran turbin 1345 rpm (140,90 rad/s) serta jumlah *frame* yang diambil adalah tiap 5° dengan *inner iteration* 1000 per *time step*. *Time step* tiap kecepatan angin disajikan pada tabel 4.2.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{\text{waktu per putaran}}$$

$$140.90 \text{ rad/s} = \frac{2\pi - 0}{\text{waktu per putaran}}$$

$$\text{Waktu per putaran} = \frac{2\pi - 0}{140.90 \text{ rad/s}} = 0.04459 \text{ s}$$

$$\text{time step} = \frac{\text{waktu per putaran}}{\text{jumlah frame}} = \frac{0.04459}{72} = 0.00062 \text{ s}$$

di mana :

θ = sudut satu putaran

θ_0 = sudut nol putaran

Tabel 4.2 Time Step Tiap Kecepatan Angin

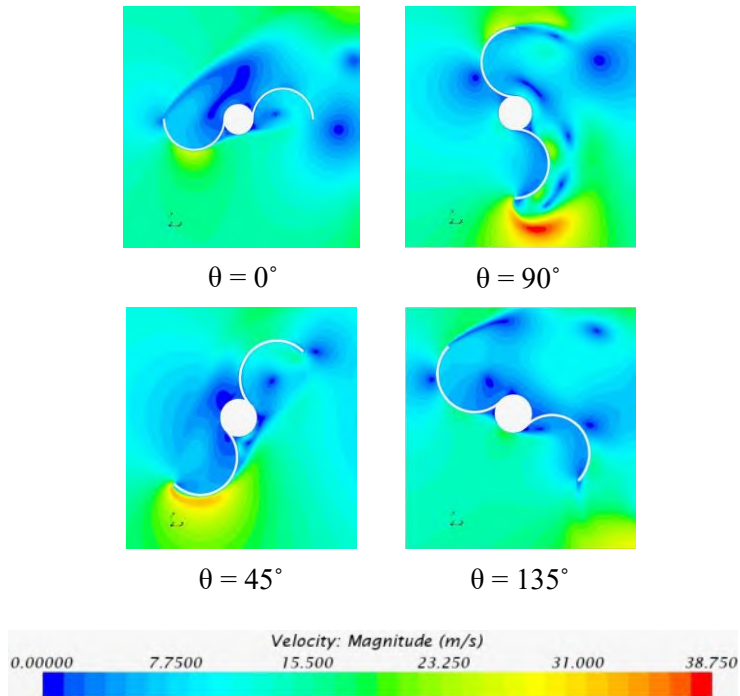
v (m/s)	ω (rpm)	ω (rad/s)	Jumlah Frame	Waktu Per Putaran	Time Step
5	440	46,10	72	0.13631	0.00189
7	666	69,77		0.09005	0.00125
9	892	93,45		0.06724	0.00093
11	1119	117,23		0.05360	0.00074
13	1345	140,90		0.04459	0.00062
15	1572	164,69		0.03815	0.00053

4.3. Analisis Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan pada kondisi dua dimensi, *unsteady* dan *rotating*, dengan putaran turbin dan TSR seperti pada tabel 4.1 serta *time step* yang dihitung di tiap kecepatan angin. Hasil yang dianalisis adalah berupa visualisasi aliran, yaitu kontur kecepatan dan tekanan. Dan berupa grafik yaitu, torsi terhadap sudut, torsi rata-rata terhadap kecepatan angin, dan koefisien daya terhadap TSR.

4.3.1. Visualisasi Aliran

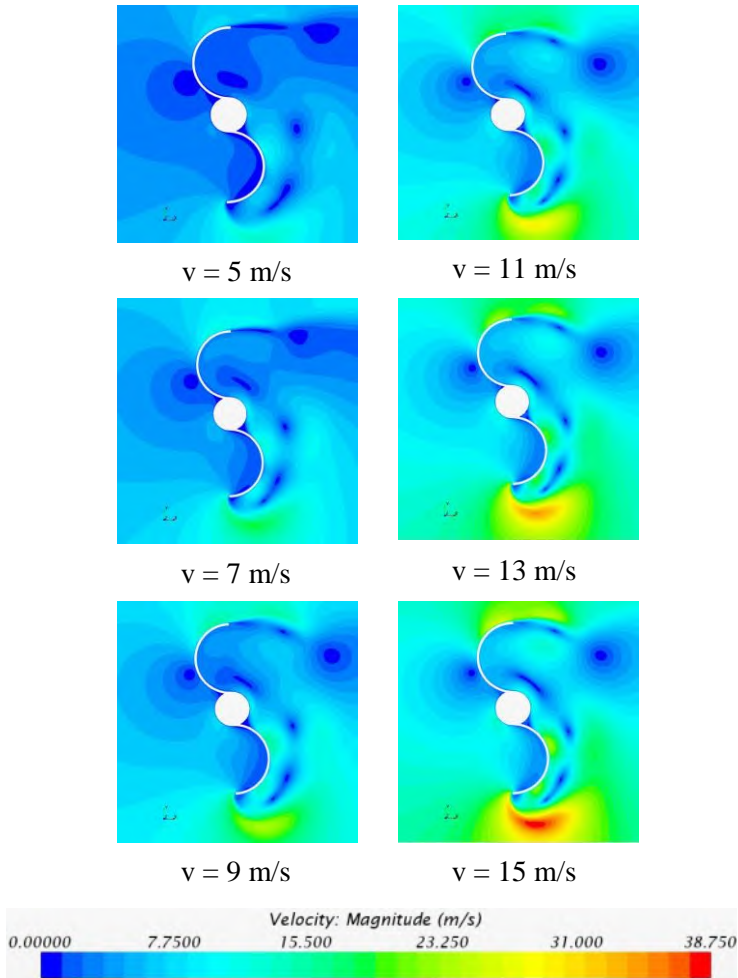
4.3.1.1. Kontur Kecepatan



Gambar 4.1 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s

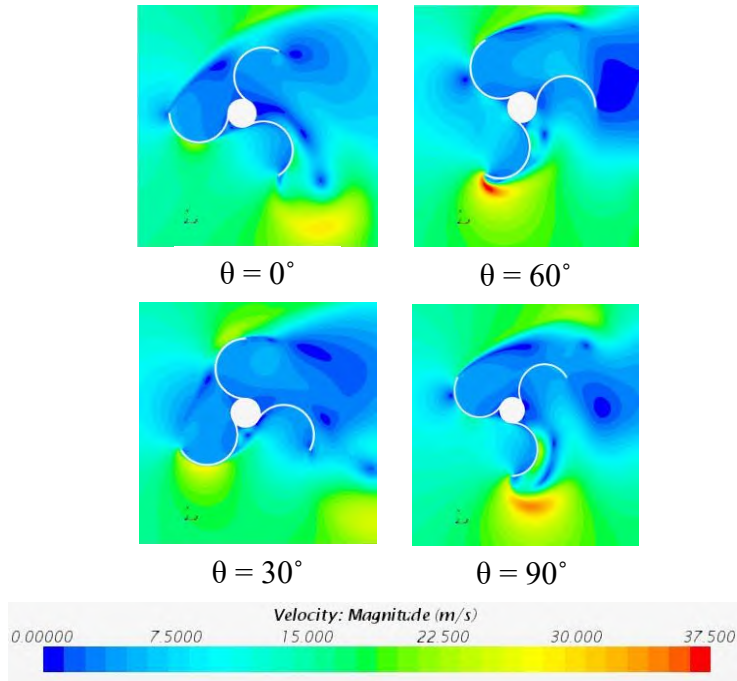
Gambar 4.1 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Savonius dua sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s. Dapat dilihat pada gambar bahwa kecepatan meningkat mulai sudut 0° dan bernilai maksimal ketika turbin angin Savonius membentuk sudut $\theta = 90^\circ$. Hal ini dikarenakan gaya *drag* pada sudu *advancing blade* lebih besar daripada sudu *returning blade* yang disebabkan oleh perbedaan bentuk permukaan sudu, di mana sudu *advancing blade* memiliki koefisien *drag* yang lebih tinggi sehingga gaya *drag* yang terjadi

lebih besar. Selain itu dapat dilihat pada gambar 4.1, sudut $\theta = 45^\circ$ memiliki daerah *blockage* yang lebih besar daripada sudut $\theta = 135^\circ$, sehingga torsi yang dihasilkan sudut $\theta = 45^\circ$ lebih rendah daripada sudut $\theta = 135^\circ$.



Gambar 4.2 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Sudut $\theta = 90^\circ$

Gambar 4.2 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Savonius dua sudu pada sudut $\theta = 90^\circ$ dengan kecepatan angin 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Daerah *wake* yang terkecil terjadi pada kecepatan 15 m/s, oleh karena itu terjadi kecepatan tinggi yang mengakibatkan terjadinya momentum yang besar sehingga mendorong sudu berlawanan arah dengan jarum jam.

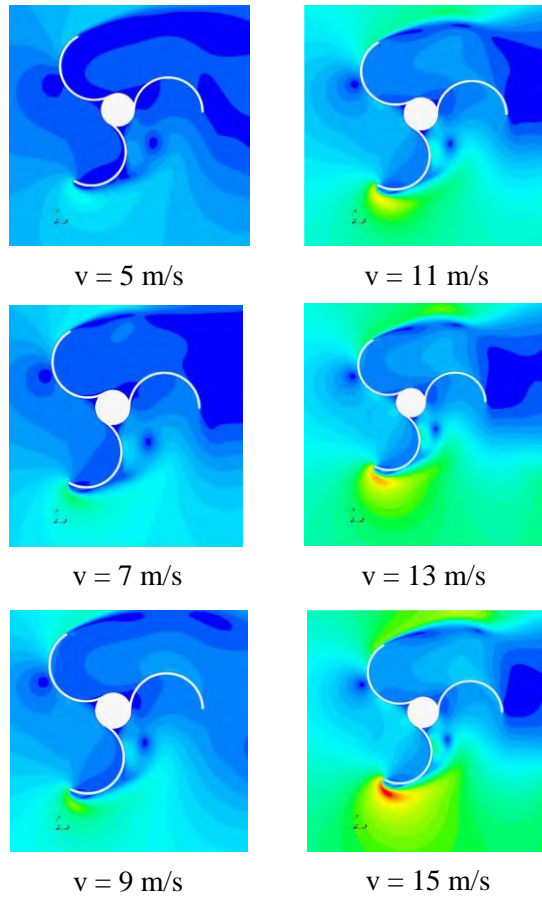


Gambar 4.3 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Tiga Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s

Gambar 4.3 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Savonius tiga sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s. Dapat dilihat pada gambar bahwa kecepatan meningkat mulai sudut 0° dan bernilai maksimal ketika turbin angin Savonius membentuk sudut $\theta = 60^\circ$. Sama seperti turbin angin Savonius dua sudu, hal ini dikarenakan gaya *drag* pada sudu

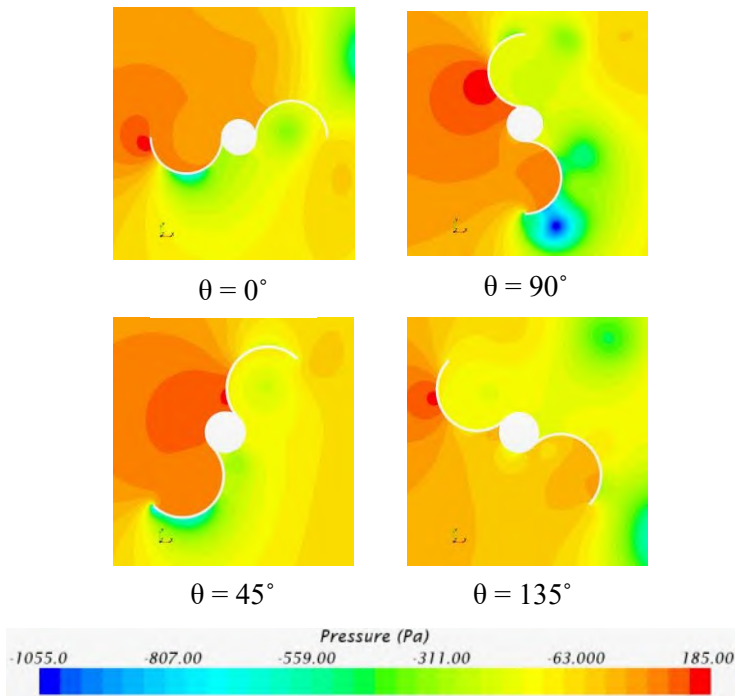
advancing blade lebih besar daripada sudu *returning blade* yang disebabkan oleh perbedaan bentuk permukaan sudu, di mana sudu *advancing blade* memiliki koefisien *drag* yang lebih tinggi sehingga gaya *drag* yang terjadi lebih besar. Perbedaan mendasar antara turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu adalah daerah *wake* yang terjadi. Di mana daerah *wake* pada turbin angin Savonius tiga sudu lebih besar daripada turbin angin Savonius dua sudu, dan hal ini menyebabkan torsi yang dihasilkan turbin angin Savonius tiga sudu lebih rendah daripada turbin angin Savonius dua sudu.

Gambar 4.4 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Savonius tiga sudu pada sudut $\theta = 60^\circ$ dengan kecepatan angin 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Sama seperti turbin angin Savonius dua sudu, daerah *wake* yang terkecil terjadi pada kecepatan 15 m/s, oleh karena itu terjadi kecepatan tinggi yang mengakibatkan terjadinya momentum yang besar sehingga mendorong sudu berlawanan arah dengan jarum jam, namun memiliki nilai kecepatan maksimal yang lebih rendah dari turbin angin Savonius dua sudu, hal ini dikarenakan jumlah sudu yang lebih banyak pada turbin angin Savonius tiga sudu sehingga mengakibatkan permukaan *drag* yang ditumbuk aliran angin semakin besar.



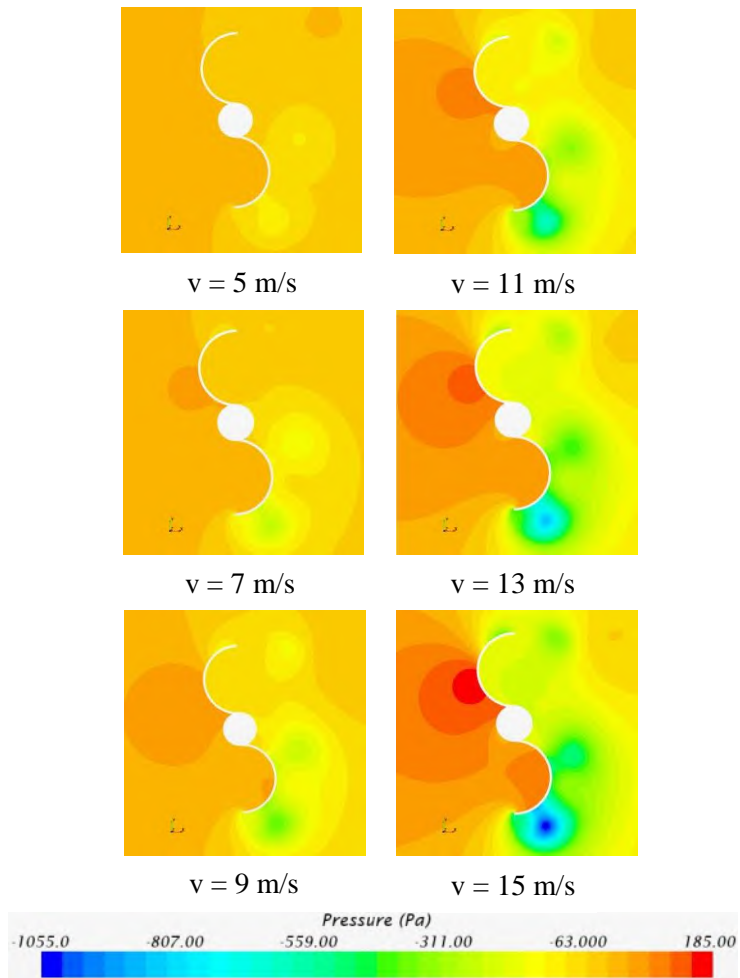
Gambar 4.4 Kontur Kecepatan Turbin Angin Savonius Tiga Sudu pada Sudut $\theta = 60^\circ$

4.3.1.2. Kontur Tekanan



Gambar 4.5 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s

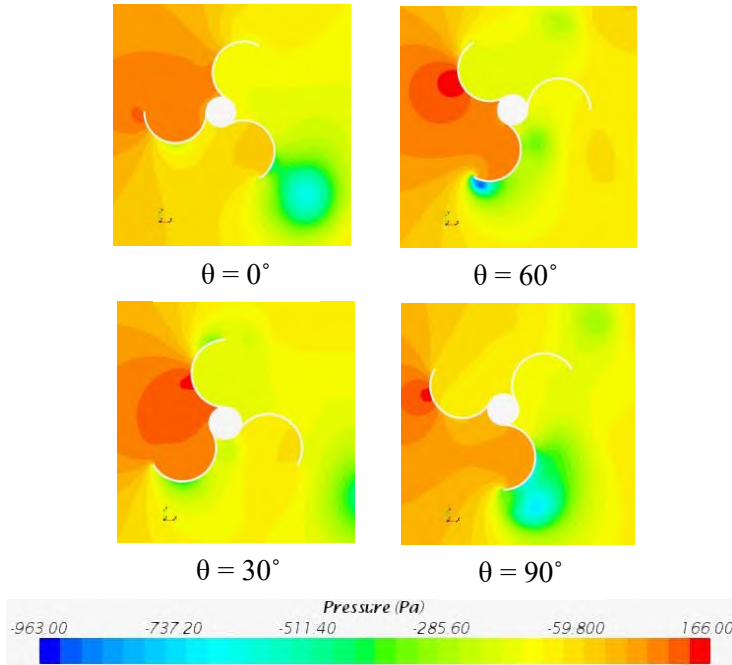
Gambar 4.5 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Savonius dua sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s. Ketika turbin angin Savonius dua sudu berada pada sudut $\theta = 0^\circ$ hingga $\theta = 90^\circ$ terjadi peningkatan perbedaan tekanan (ΔP), sedangkan ketika berada pada sudut $\theta = 90^\circ$ hingga $\theta = 180^\circ$ terjadi penurunan perbedaan tekanan (ΔP). Selain itu dapat dilihat sudut $\theta = 45^\circ$ memiliki perbedaan tekanan (ΔP) yang lebih rendah daripada sudut $\theta = 135^\circ$, sehingga torsi yang dihasilkan sudut $\theta = 45^\circ$ lebih rendah daripada sudut $\theta = 135^\circ$.



Gambar 4.6 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Dua Sudu pada Sudut $\theta = 90^\circ$

Gambar 4.6 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Savonius dua sudu pada sudut $\theta = 90^\circ$ dengan kecepatan 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Dapat dilihat pada tiap kecepatan, perbedaan

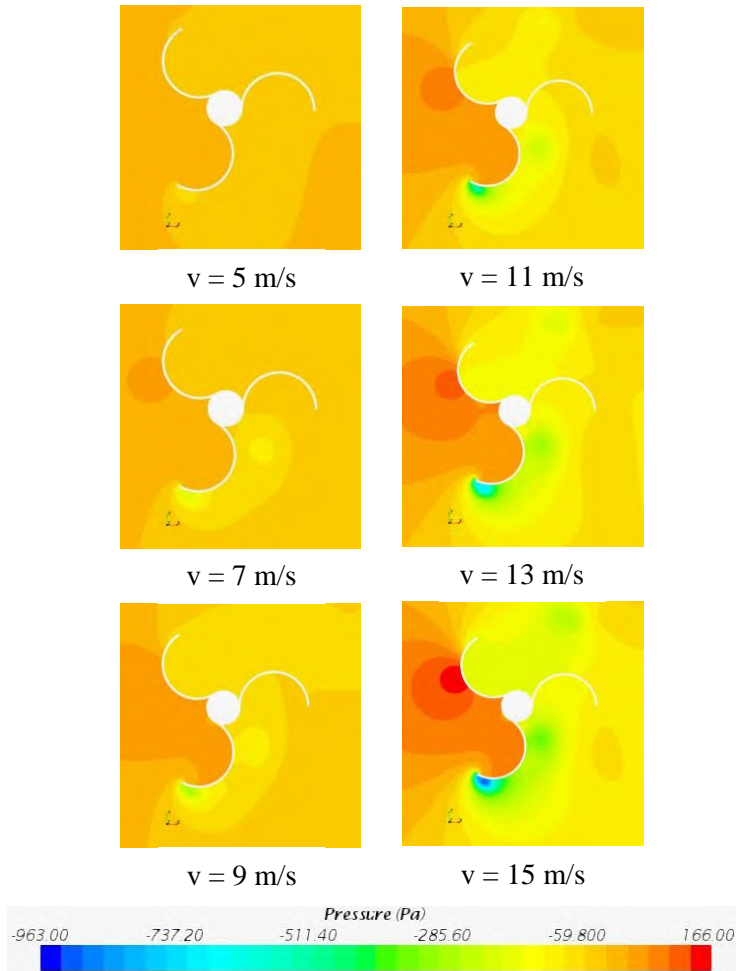
tekanan (ΔP) tertinggi terjadi pada *advancing blade* sehingga membuat turbin berputar berlawanan arah dengan jarum jam.



Gambar 4.7 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Tiga Sudu pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s

Gambar 4.7 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Savonius tiga sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s. Ketika turbin angin Savonius dua sudu berada pada sudut $\theta = 0^\circ$ hingga $\theta = 60^\circ$ terjadi peningkatan perbedaan tekanan (ΔP), sedangkan ketika berada pada sudut $\theta = 60^\circ$ hingga $\theta = 120^\circ$ terjadi penurunan perbedaan tekanan (ΔP). Selain itu dapat dilihat sudut $\theta = 30^\circ$ memiliki perbedaan tekanan (ΔP) yang lebih rendah daripada sudut $\theta = 120^\circ$, sehingga torsi yang dihasilkan sudut $\theta = 30^\circ$ lebih rendah daripada sudut $\theta = 120^\circ$. Perbedaan mendasar

antara turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu adalah perbedaan tekanan (ΔP) pada *advancing blade*-nya. Perbedaan tekanan yang terjadi pada sudu *advancing blade* turbin angin Savonius tiga sudu lebih rendah daripada dua sudu.

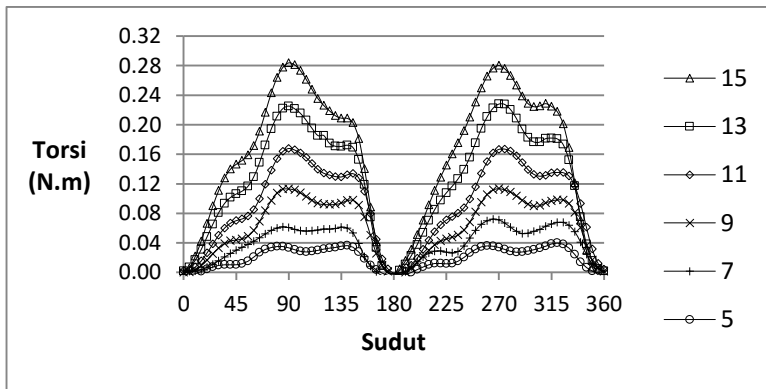


Gambar 4.8 Kontur Tekanan Turbin Angin Savonius Dua Sudu Pada Sudut $\theta = 60^\circ$

Gambar 4.8 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Savonius tiga sudu pada sudut $\theta = 60^\circ$ dengan kecepatan 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Dapat dilihat pada tiap kecepatan, perbedaan tekanan (ΔP) tertinggi terjadi pada *advancing blade* sehingga membuat turbin berputar berlawanan arah dengan jarum jam.

4.3.2. Grafik

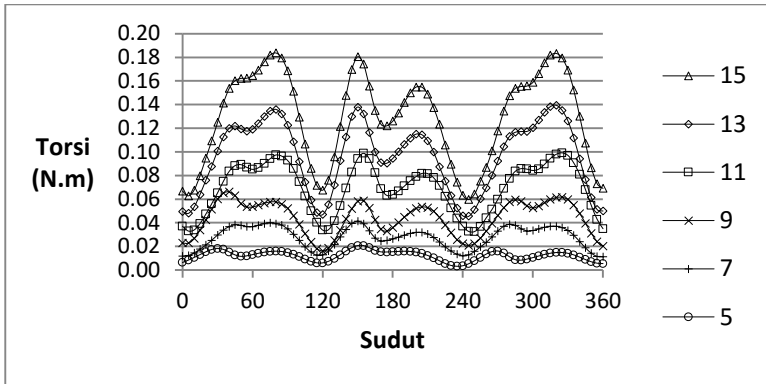
4.3.2.1. Torsi pada Tiap Sudut



Gambar 4.9 Grafik Torsi Terhadap Sudut Turbin Angin Savonius Dua Sudu

Gambar 4.9 menunjukkan torsi yang terjadi pada tiap sudut turbin angin Savonius dua sudu. Pada gambar 4.9 dapat dilihat bahwa torsi meningkat seiring dengan meningkatnya sudut mulai 0° - 90° . Hal ini dikarenakan pada saat turbin angin Savonius dua sudu berada pada sudut 90° gaya *drag* yang terjadi pada sudu *advancing blade* lebih besar daripada sudu *returning blade*, sehingga terjadi perputaran pada turbin angin Savonius dua sudu. Perputaran turbin angin Savonius dapat dilihat pula dari perbedaan tekanannya, ketika turbin angin Savonius dua sudu berada pada sudut $\theta = 0^\circ$ hingga $\theta = 90^\circ$ terjadi peningkatan perbedaan tekanan (ΔP) sekaligus meningkatnya nilai torsi, sedangkan ketika berada pada sudut $\theta = 90^\circ$ hingga $\theta = 180^\circ$

terjadi penurunan perbedaan tekanan (ΔP) sekaligus menurunnya nilai torsi.



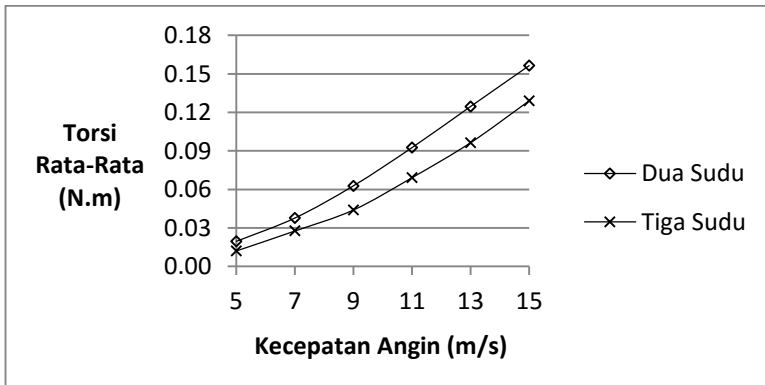
Gambar 4.10 Grafik Torsi Terhadap Sudut Turbin Angin Savonius Tiga Sudu

Gambar 4.10 menunjukkan torsi yang terjadi pada tiap sudut turbin angin Savonius tiga sudu. Pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa torsi meningkat seiring dengan meningkatnya sudut mulai 0° - 60° . Hal ini dikarenakan ketika turbin angin Savonius tiga sudu berada pada posisi 60° angin pertama kali menumbuk dua sudu yang memiliki koefisien *drag* yang berbeda, sehingga terjadi gaya *drag* yang lebih besar pada sudu yang memiliki koefisien *drag* yang lebih besar, yaitu sudu *advancing blade* dan membuat turbin angin Savonius tiga sudu berputar. Perputaran turbin angin Savonius dapat dilihat pula dari perbedaannya, ketika turbin angin Savonius tiga sudu berada pada sudut $\theta = 0^\circ$ hingga $\theta = 60^\circ$ terjadi peningkatan perbedaan tekanan (ΔP) sekaligus meningkatnya nilai torsi, sedangkan ketika berada pada sudut $\theta = 60^\circ$ hingga $\theta = 120^\circ$ terjadi penurunan perbedaan tekanan (ΔP) sekaligus menurunnya nilai torsi. Perbedaan mendasar yang dapat dilihat pada grafik torsi terhadap sudut turbin angin Savonius tiga sudu dengan dua sudu adalah *uniformity* torsi yang dihasilkan turbin angin Savonius tiga sudu lebih baik daripada dua sudu, di

mana hal ini dapat dilihat dari selisih torsi terendah dan tertinggi. . Sehingga turbin angin Savonius tiga sudu memiliki konsistensi yang lebih baik dalam menghasilkan daya.

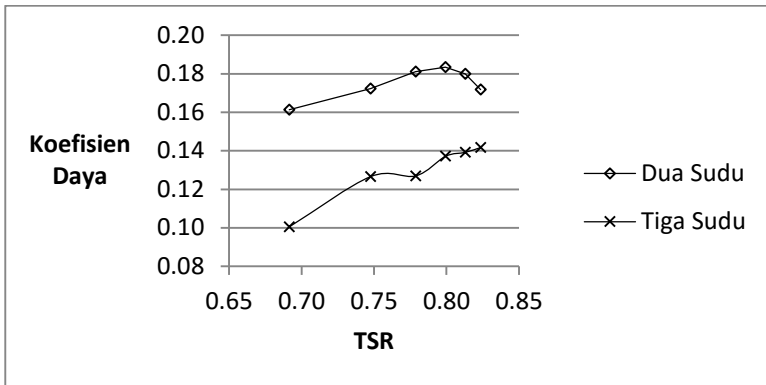
4.3.2.2. Torsi Rata-Rata pada Tiap Kecepatan Angin

Gambar 4.11 menunjukkan torsi rata-rata yang terjadi pada tiap kecepatan angin turbin angin Savonius baik dua sudu maupun tiga sudu. Kedua torsi rata-rata ini terjadi pada kecepatan 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Dapat dilihat pada gambar 4.11 torsi rata-rata pada turbin angin Savonius baik dua sudu maupun tiga sudu akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin. Pada kecepatan 15 m/s, torsi untuk dua sudu bernilai 0, 156 Nm dan untuk tiga sudu bernilai 0, 129 Nm. Karena dengan meningkatnya kecepatan angin, maka momentum yang mengenai sudu semakin besar sehingga daya yang dapat diekstrak semakin besar.



Gambar 4.11 Grafik Torsi Terhadap Kecepatan Angin Turbin Angin Savonius

4.3.2.3. Koefisien Daya



Gambar 4.12 Grafik Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin Turbin Angin Savonius

Performa turbin angin Savonius dapat dilihat dari koefisien daya yang didapatkan dari :

$$C_{power} = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = C_T \lambda$$

di mana,

- P = daya yang dapat diekstrak (Watt)
- T = torsi turbin angin Savonius (N.m)
- ω = putaran turbin angin Savonius (rad/s)
- ρ = massa jenis (kg/m^3)
- A = luas penampang rotor (m^2)
- v = kecepatan angin (m/s)
- C_T = koefisien torsi
- λ = tip speed ratio

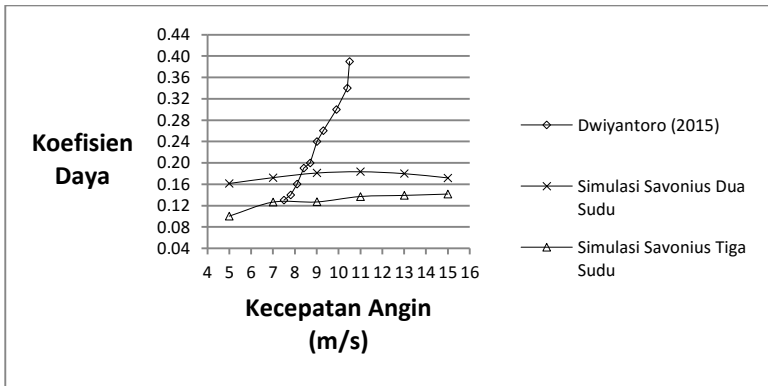
Gambar 4.12 menunjukkan hubungan antara koefisien daya terhadap TSR pada turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu. Koefisien daya turbin angin Savonius dua sudu mencapai nilai

tertinggi yaitu 0,183 pada TSR 0,80 serta memiliki nilai terendah 0,161 pada TSR 0,69. Koefisien daya turbin angin Savonius tiga sudu mengalami peningkatan mulai TSR 0,69 yang bernilai 0,100 hingga TSR 0,82 yang bernilai 0,142.

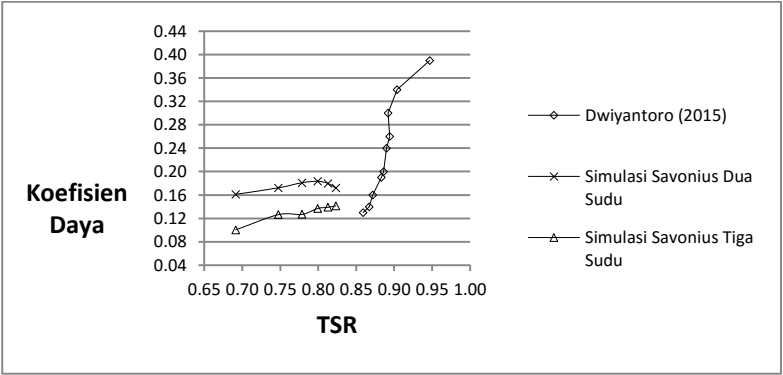
Pada rentang TSR 0,69-0,82 turbin angin Savonius dua sudu memiliki nilai koefisien daya yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tiga sudu, hal ini dikarenakan semakin banyak sudu, maka semakin besar permukaan *drag* yang melawan aliran angin, sehingga menghasilkan koefisien daya yang lebih rendah. Meningkatnya nilai koefisien daya pada turbin angin Savonius tiga sudu hingga TSR 0,82 disebabkan oleh belum tercapainya kecepatan maksimal yang dapat dicapai oleh turbin angin Savonius tiga sudu. Hasil simulasi ini sesuai dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Saha et al (2008).

LAMPIRAN

Dimensi turbin angin Savonius yang digunakan pada simulasi sama dengan yang digunakan pada eksperimen turbin angin Darrieus-Savonius oleh Dwiyantoro (2015). Lampiran 1 menunjukkan bahwa data putaran turbin yang diambil untuk simulasi ini masih bersesuaian serta lampiran 2 menunjukkan bahwa simulasi numerik ini dapat merepresentasikan hasil dengan baik apabila dibandingkan dengan nilai yang diperoleh dari eksperimen, meskipun tidak dapat divalidasi secara langsung.



Lampiran 1. Grafik Koefisien Daya Terhadap Kecepatan Angin Berdasarkan Hasil Ekperimen dan Simulasi



Lampiran 2. Grafik Koefisien Daya Terhadap TSR Berdasarkan Hasil Ekperimen dan Simulasi

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Pada simulasi turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu dengan variasi kecepatan angin 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s dapat disimpulkan bahwa :

- 1) Jumlah sudu memiliki pengaruh terhadap torsi yang dihasilkan. Torsi maksimal untuk turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu terjadi pada kecepatan angin 15 m/s. Pada turbin angin Savonius dua sudu nilai torsi maksimal adalah 0,156 Nm, sedangkan turbin angin Savonius tiga sudu bernilai 0,129 Nm. Hal ini dikarenakan semakin banyak sudu, maka semakin besar permukaan *drag* yang melawan aliran angin dan mengakibatkan penurunan koefisien daya.
- 2) Koefisien daya maksimal yang dapat dicapai turbin angin Savonius dua sudu adalah 0,183 pada TSR 0,80. Sedangkan pada turbin angin Savonius tiga sudu koefisien daya maksimal adalah 0,142 pada TSR 0,82. Secara keseluruhan, pada rentang TSR 0,69-0,82 turbin angin Savonius dua sudu memiliki nilai koefisien daya lebih baik. Namun, turbin angin Savonius tiga sudu menghasilkan *uniformity* torsi yang lebih baik daripada turbin angin Savonius dua sudu.

5.2. Rekomendasi

Adapun beberapa rekomendasi yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut :

- 1) Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan *turbulence model* yang lain, seperti *k- ϵ realizable two layer*, *k- ω* , atau Spalart Allmaras untuk turbin angin Savonius.
- 2) Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan geometri lain pada turbin angin Savonius tiga sudu.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

Dwiyantoro B.A., Suphandani, Vivien, Rahman. 2015. *Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus-Savonius*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV).

Rogowski K., Maronski R. 2015. *CFD Computation Of The Savonius Rotor*. Journal Of Theoretical And Applied Mechanics Vol. 53, No. 1, pp. 37-45.

Tian W., Song B., VanZweiten J. H., Pyakurel P. 2015. *Computational Fluid Dynamics Prediction Of A Modified Savonius Wind Turbine With Novel Blade Shapes*. Energies 2015 Vol. 8, pp. 7915-7929.

Kacprzak K., Liskiewicz G., Sobczak K.. 2013. *Numerical Investigation Of Conventional And Modifies Savonius Wind Turbines*. Journal Of Renewable Energy Vol. 60, pp. 578-585.

Menet Menet, Rezende T.D. 2013. *Static & Dynamic Study Of A Conventional Savonius Rotor Using A Numerical Simulation*. 21e Congres Francais de Mecanique (CFM).

Nasef M.H., El-Askary W.A., Abdel-Hamid A.A., Gad H.E. 2013. *Evaluation Of Savonius Rotor Performance : Static And Dynamic Studies*. Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics Vol. 123, pp. 1-11.

Sukanta R., Saha U.K. 2013. *Computational Study To Assess The Influence Of Overlap Ratio On Static Torque Characteristic Of A Vertical Axis Wind Turbine*. Journal Of Procedia Engineering Vol. 51, pp. 694-702.

Saha, U.K., Maity D. 2008. *Optimum Design Configuration Of Savonius Rotor Through Wind Tunnel Experiments*. Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics Vol. 96, No. 8, pp. 1359-1375.

Akwa, J.A., Vielmo H.A., Petry A.P. 2012. *A Review On The Performance Of Savonius Wind Turbines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 16, pp. 3054-3064.

Fox R.W., Pritchard P.J., McDonald A.T., 2010, *“Introduction to Fluid Mechanics 7th”*, John Wiley & Sons, Inc, Singapore.

TENTANG PENULIS



Muhamad Falah Dias Sunandi, lahir di Kabupaten Cianjur 5 Juli 1991. Anak pertama dari Intan Asmarita dan Tavip Sunandi. Penulis mulai menuntut ilmu dari jenjang TK Paripurna (1995-1997), lalu melanjutkan ke SD Al-Falah Surabaya (1997-2003), kemudian melanjutkan ke SMP Al-Falah Sidoarjo (2003-2006), dan SMA Negeri 2 Surabaya (2006-2009). Pada tahun 2010 penulis melanjutkan studi Strata 1 di Teknik Mesin FTI ITS. Ketika menimba ilmu di perkuliahan, penulis mengikuti organisasi Mesin ITS Autosport, dimulai dari semester 3 dan 4 menjadi Staf Divisi Racing. Kemudian menjadi Ketua Mesin ITS Autosport pada semester 5 dan 6. Pada tahun 2013, penulis menjadi sekretaris pertama pada acara nasional, yaitu Indonesia Energy Marathon Challenge 2013 yang diselenggarakan di Surabaya. Selain kegiatan perkuliahan, penulis juga berperan aktif baik sebagai panitia maupun peserta di acara kampus, olahraga otomotif, pelatihan pengembangan diri, pelatihan *software engineering*, dan sertifikasi. Penulis bermimpi tentang Indonesia yang lebih baik, yang dipandang sebagai negara terhormat di mata dunia internasional. Penulis dapat dihubungi melalui : 0812 1212 6360 & diassunandi@gmail.com.

(halaman ini sengaja dikosongkan)